

# **Trabajo Fin de Grado**

**Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales**

## **Simulación y validación de la curva de tracción de materiales metálicos**

*Autora: Mercedes Morales Pérez*

*Tutores: Fátima Ternero Fernández y Juan Manuel Montes Martos*

**Dpto. Ingeniería y Ciencia de los Materiales y del Transporte  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

# **Simulación y validación de la curva de tracción de materiales metálicos**

Autora:

Mercedes Morales Pérez

Tutores:

Fátima Ternero Fernández (Profesora Sustituta Interina)

Juan Manuel Montes Martos (Catedrático de Universidad)

Dpto. Ingeniería y Ciencia de los Materiales y del Transporte

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Grado: Simulación y validación de la curva de tracción de materiales metálicos

Autora: Mercedes Morales Pérez  
Tutores: Fátima Ternero Fernández  
Juan Manuel Montes Martos.

El tribunal nombrado para juzgar el TFG arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal,

Fecha:





# Agradecimientos

---

A mi familia y a mis amigos por su apoyo, así como a José Miguel, por ayudarme siempre y motivarme.

*Mercedes Morales Pérez*

*Sevilla, 2019*

# Resumen

---

En este trabajo se han simulado las curvas de tracción de probetas de acero C45, aluminio 2011, acero 304, latón y fundición gris bajo distintas condiciones de ensayo y se han ajustado (mediante mínimos cuadrados) a las curvas de tracción obtenidas experimentalmente en trabajos previos. Se pretendía comprobar la idoneidad del simulador y de los parámetros elegidos como ajustables. Se pretendía, además, estudiar la sensibilidad de los distintos materiales con respecto a la velocidad de deformación o a la temperatura de ensayo. La tendencia de cada parámetro estudiado (límite elástico, deformación alcanzada con la rotura del material, tensión máxima, etc.) con la variación de la temperatura o la velocidad ha sido representada gráficamente y, a partir de estas figuras, se ha obtenido el polinomio normalizado que define dichas evoluciones, y que permitiría conocer el valor de cada propiedad para condiciones previamente no ensayadas. Aun cuando el ajuste entre simulaciones y curvas experimentales ha resultado razonablemente bueno, en general, y muy bueno en casos concretos, se puede concluir que la programación del simulador debe ser optimizada para solventar algunos errores que no permiten obtener de manera directa y exacta las características de los materiales que se obtienen a partir del ensayo de tracción (tensión máxima, deformación a la rotura, límite elástico, etc.).



# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>6</b>
<b>Resumen</b>	<b>7</b>
<b>Índice</b>	<b>9</b>
<b>1. Introducción y objetivos</b>	<b>11</b>
1.1 CONCEPTOS TEÓRICOS	11
1.2 OBJETIVOS	16
<b>2. Materiales estudiados</b>	<b>18</b>
2.1 PROBETAS DE ACERO C45	18
2.2 PROBETAS DE ALUMINIO 2011	19
2.3 PROBETAS DE ACERO 304	20
2.4 PROBETAS DE LATÓN	21
2.5 PROBETAS DE FUNDICIÓN GRIS	22
<b>3. Procedimiento experimental</b>	<b>23</b>
3.1 REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS	23
3.2 MÉTODO DE AJUSTE EMPLEADO	23
3.3 PROCEDIMIENTO DE INTRODUCCIÓN DE DATOS Y SIMULACIÓN	25
3.4 AJUSTE POLINÓMICO	28
<b>4. Análisis de resultados</b>	<b>29</b>
4.1 ACERO C45	29
4.2 TRACCIONES DEL ALUMINIO 2011	44
4.3 TRACCIONES DEL ACERO 304	53
4.4 TRACCIONES DEL LATÓN	56
4.5 TRACCIONES DE LA FUNDICIÓN GRIS	63
<b>5. Conclusiones</b>	<b>71</b>
<b>6. Líneas futuras</b>	<b>73</b>
<b>7. Índice de Figuras</b>	<b>74</b>
<b>8. Índice de Tablas</b>	<b>77</b>



# 1. Introducción y objetivos

---

## 1.1 Conceptos teóricos

### El ensayo de tracción

Para el estudio de las propiedades mecánicas de los materiales metálicos, el *ensayo de tracción* es el más apropiado. Este ensayo consiste en someter a una probeta, sujeta por sus extremos, a una carga uniaxial creciente, al tiempo que se registran la carga aplicada y el alargamiento hasta que el material rompe. A partir de estos valores se obtienen los de esfuerzo y deformación necesarios para representar la curva  $e-s$ .

Los ensayos de tracción deben realizarse siguiendo las especificaciones de las Normas UNE, donde se especifican los métodos de ensayo a diferentes temperaturas (altas, bajas o temperatura ambiente). También definen los parámetros que pueden determinarse, las condiciones de ensayo, el mecanizado de las muestras que deben utilizarse, la simbología a emplear, etc. En este trabajo se han empleado las normas que se refieren a ensayos realizados a temperatura ambiente <sup>[1]</sup> y a altas temperaturas <sup>[2]</sup>, ya que para el estudio de las sensibilidades se han realizado ensayos a distintas velocidades y a temperatura ambiente o a distintas temperaturas y a la velocidad de referencia. En un futuro deberán hacerse ensayos a bajas temperaturas siguiendo la norma correspondiente <sup>[3]</sup>.

### Definiciones reales e ingenieriles

Cuando se habla de esfuerzo y deformación *ingenieriles* ( $s$  y  $e$  respectivamente), hay que tener en cuenta que estos están basados en las dimensiones originales de la muestra y son tanto más apropiadas cuanto más pequeños sean los cambios dimensionales que sufre el material.

Si las deformaciones toman valores muy significativos, y por tanto se abandona el rango de comportamiento elástico, es más conveniente emplear los conceptos de esfuerzo y deformación *reales* o *verdaderos* ( $\sigma$  y  $\epsilon$  respectivamente), que varían en cada instante de tiempo.

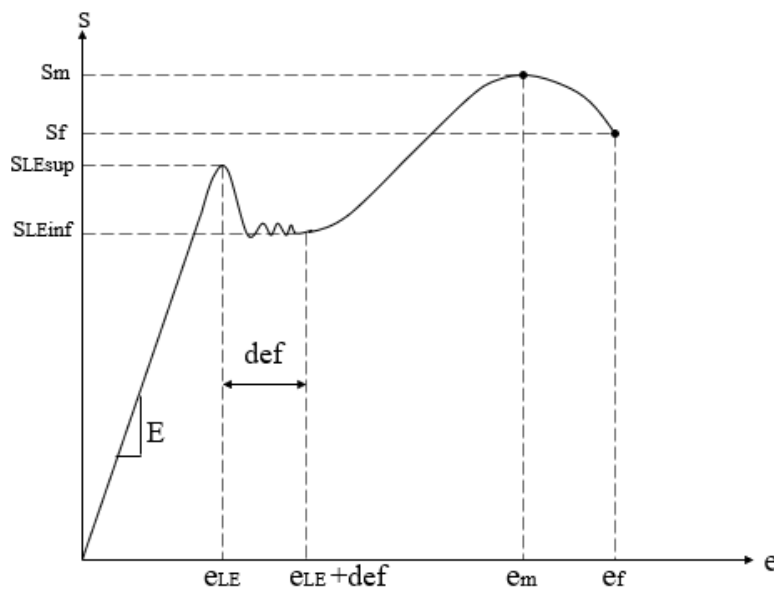
Las variables *ingenieriles* y *reales* difieren tanto más cuanto mayor es la deformación. De ahí que, en el ámbito del comportamiento elástico, en el que en general las deformaciones son pequeñas, los valores de esfuerzo y deformación arrojados por ambas definiciones resulten coincidentes.

En el contexto de la Ingeniería son casi siempre preferidas las definiciones *ingenieriles*, aun cuando las deformaciones sean tan grandes que el material haya dejado de comportarse

elásticamente. Sin embargo, la descripción rigurosa del comportamiento del material solo puede hacerse a través de las definiciones de las variables reales.

### La curva esfuerzo-deformación

La curva *esfuerzo-deformación* es fundamental para la descripción del comportamiento mecánico de los materiales, ya que contiene información relevante como el módulo de Young, el límite elástico, la resistencia y la deformación a la tracción. Esta curva reproduce perfectamente tanto la zona de deformación elástica, como la de deformación plástica hasta la rotura del material, como puede observarse en la Fig. 1.1.



**Figura 1.1.** Curva de tracción ingenieril de un metal genérico.

Esta curva también sirve para clasificar los materiales en *frágiles* o *dúctiles*. Los primeros presentan una curva creciente que encuentra su fin para valores pequeños de deformación. En cambio, los segundos se caracterizan por una curva mucho más extensa en la que se puede observar como el material, una vez superado el límite elástico, es capaz de soportar grandes deformaciones antes de romperse. En ambos casos, a la zona lineal característica de la deformación elástica le sigue una no lineal propia de la deformación plástica. La extensión de esta zona plástica dependerá de la naturaleza del material.

La *zona elástica* puede describirse mediante la *ley de Hooke*, representada por la Ec. (1.1), donde  $E$  es el módulo elástico y  $\varepsilon$  la deformación real:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1.1)$$



Del mismo modo, la *zona de deformación plástica uniforme* suele aproximarse por la *ecuación de Hollomon*, representada en la Ec. (1.2) y donde  $k$  es el coeficiente de resistencia y  $n$  el exponente de endurecimiento por deformación:

$$\sigma = k \cdot \varepsilon^n \quad (1.2)$$

Los valores de  $k$  y  $n$  pueden obtenerse a partir de ensayos y tomando logaritmos la ecuación, de modo que se represente  $\ln \sigma$  frente a  $\ln \varepsilon$  para una serie de puntos. Obteniendo la línea de tendencia de este gráfico,  $\ln k$  será el punto de intersección con el eje de abscisas y  $n$  la pendiente. El valor de  $n$  varía entre 0 y 1 según el comportamiento del material; tanto más próximo a 1 cuanto más elástico sea. Además, el coeficiente de endurecimiento de un material resulta ser igual a la máxima deformación real uniforme en el mismo ( $\varepsilon_M$ ). La *zona plástica no uniforme* suele aproximarse por la ecuación de una recta.

La *zona plástica* de los materiales metálicos presenta primero un ascenso gradual hasta llegar a un nivel máximo de esfuerzo, para el que se produce una deformación  $e_M$ , denominada *deformación plástica uniforme límite*. Para este máximo, el valor del esfuerzo se denomina resistencia a la tracción,  $s_M$ . Después de este máximo, la curva comienza a decrecer hasta que se produce la rotura del material, en el punto  $(e_F, s_F)$ . A este valor del esfuerzo se le llama resistencia a la fractura.

En cuanto a los materiales dúctiles metálicos, que la curva ascienda hasta un máximo durante la zona plástica indica que el material se endurece durante esta deformación. Es el empleo de variables ingenieriles lo que provoca que a partir de este punto la curva descienda. Con el empleo de variables reales se puede comprobar que el material sigue endureciéndose hasta romper.

Este cambio de pendiente de la curva marca la transición de una deformación plástica uniforme a uno no uniforme, y a su vez, indica la aparición de una zona en la cual esta deformación plástica se desarrolla más intensamente, marcando esta transición. Este hecho provoca la aparición de un estrangulamiento o cuello en el material, por donde la sección transversal de este disminuye. Los materiales con altos valores de  $n$ , que como se explicó previamente coincide con el valor de deformación máxima uniforme real, admitirán deformaciones mayores antes de que se forme el cuello. Comenzará entonces la deformación del cuello, que conducirá a la degradación de la estructura microscópica del material por aparición de microporos y, finalmente, a su fractura.

Tras la reducción local de la sección que provoca la formación del cuello, la fuerza necesaria para aumentar la deformación disminuye. Por esta razón, en la curva  $e-s$  obtenida a partir de los valores ingenieriles de deformación y esfuerzo, este último disminuye, ya que, como se puede observar en la Ec. (1.3), este es proporcional a la fuerza:

$$s = F/A_0 \quad (1.3)$$

donde  $A_0$  es la sección transversal inicial de la barra, que es constante.

En términos de variables reales, el esfuerzo varía con la fuerza según la Ec. (1.4), donde tanto  $F$  como  $A$  como varían, ya que esta última representa la sección de la probeta en cada instante, que va disminuyendo.

$$\sigma = F/A \quad (1.4)$$

Por otra parte, se sabe que algunos materiales presentan una curva  $e-s$  con una zona de transición entre el comportamiento elástico y el plástico. A esta zona se la conoce como *zona de fluencia*. Durante este periodo, el material fluye bajo un esfuerzo relativamente constante. Externamente, se caracteriza por la aparición de las *bandas de Lüders*, que se inician en zonas del material que concentran muchos esfuerzos, y que dan lugar a un inaceptable acabado superficial.

Esta zona de fluencia produce lo que se conoce como envejecimiento de deformación cuando, tras haber cargado un material hasta su zona plástica uniforme, se vuelve a cargar. Este envejecimiento provocará que la respuesta del material no sea la misma si esta carga se realiza tras un periodo de tiempo largo o corto. Sin embargo, en los materiales que no presentan zona de fluencia, la respuesta ante esta segunda carga sí será la misma independientemente del tiempo que transcurra tras la primera descarga. <sup>[4]</sup>

## Sensibilidades

Otro aspecto importante para tratar es el efecto que tiene la *temperatura* sobre las propiedades mecánicas de los materiales. De forma resumida, puede decirse que, al aumentar la temperatura del ensayo, el material se vuelve menos rígido, más blando y dúctil. Este aumento de la ductilidad se debe a la mayor facilidad del movimiento de las dislocaciones con el aumento de la temperatura. Su influencia puede ser tal que, para valores superiores a 0.3-0.4 veces la temperatura de fusión, se experimente un nuevo fenómeno denominado *termofluencia*, de forma que el material continúe deformándose sin aumento alguno del esfuerzo soportado.

No hay consenso entre los autores acerca de cómo modelar las variaciones térmicas de las distintas propiedades mecánicas. Por esta razón, en este trabajo se ensayarán dependencias de tipo polinómico de grado 3. De este modo, si  $p_{amb}$  representa el valor de cierta propiedad mecánica determinada a la temperatura ambiente, y  $p$  representa en valor a la temperatura  $T$ , supondremos válida una relación tal que:

$$p = p_{amb} \cdot (a_3 \cdot T^3 + a_2 \cdot T^2 + a_1 \cdot T + a_0) \quad (1.5)$$

Además de la temperatura, la *velocidad de deformación* a la que se somete el material también influye significativamente sobre el comportamiento plástico de los materiales. En general, con un aumento de esta velocidad, el material se vuelve más duro y más frágil, justo al contrario que con el aumento de temperatura. Gracias a que los efectos producidos por velocidad y temperatura son opuestos, pueden compensarse unos con otros. Además, los efectos del ritmo de deformación sobre el esfuerzo son mayores cuanto mayor sea la temperatura.

Tampoco existe consenso entre los autores acerca de cómo se puede describir matemáticamente la influencia de la velocidad de deformación en las propiedades mecánicas. El modelo que aquí adoptaremos es el siguiente. Si  $v_0$  es la velocidad de deformación recomendada por la norma (en N/s o mm/s) y  $s_0$  el valor de cierta propiedad mecánica (con dimensiones de esfuerzo) determinada para la velocidad recomendada, entonces el valor de la misma propiedad,  $s$ , determinada bajo un ensayo realizado a velocidad de deformación  $v$  (mayor o menor que la recomendada por la norma), puede expresarse como:

$$s = s_0 \cdot f \quad (1.6)$$

donde

$$f = (v/v_0)^\alpha \quad \text{y} \quad \alpha = \frac{1}{4} (T/T_F)^3 \quad (1.7)$$

siendo  $T_F$  la temperatura de fusión del material. (Fíjese que se cumple que si  $v = v_0$ , entonces  $f = 1$ .)

En cambio, para una propiedad con dimensiones de deformación, que toma el valor  $e_0$  para la velocidad recomendada  $v_0$ , para una velocidad  $v$  diferente, tomará el valor  $e$  dado por:

$$e = e_0 / f \quad (1.8)$$

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es conseguir simular la curva de esfuerzo-deformación de materiales metálicos en cualesquiera condiciones de ensayo, de forma que se pueda predecir dicha curva sin necesidad de acudir a un laboratorio.

Este interés surge del hecho de que el ensayo de tracción supone un coste elevado para cualquier empresa, ya que la maquinaria necesaria supone unos altos costes de inversión y de mantenimiento que conlleva y los costes de elaboración de las probetas necesarias. Si a esto se le añade la amplia gama de materiales que existen en la actualidad, resulta bastante interesante que pueda reducirse este abanico de posibilidades mediante una simulación. De esta forma, ante la necesidad de un material con unas ciertas características, el número de ensayos necesarios para la elección del más conveniente será mucho más reducido. Además, ya que para el usuario se presentará esta simulación como una simple macro de Excel, no será necesario disponer de un personal muy especializado para ejecutarla.

Para poder obtener un modelo de ajuste fiable, se han ensayado una serie de materiales distintos en cuanto a composición y/o tratamiento térmico. Además, de cada material se han ensayado diferentes probetas a diversas velocidades de ensayo o temperaturas de trabajo.

De este modo, se analizará la influencia que tiene en la práctica variar la velocidad o la temperatura de ensayo, y se tratará de obtener una función de ajuste que sea capaz de predecir estos efectos a partir de unas condiciones de referencia. Estas referencias serán, 0.0125 mm/s para la velocidad de deformación en el ensayo y la temperatura ambiente (25 °C) para la temperatura de ensayo. Los materiales estudiados se han sometido tanto a velocidades mayores a la de referencia como a menores; mientras que para la temperatura se ha insistido únicamente sobre el efecto que provoca su aumento.

Por lo tanto, dentro del principal objetivo del presente trabajo, se comprende el análisis de la sensibilidad de las curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  de los materiales metálicos frente a temperatura y frente a velocidad de ensayo y la obtención de funciones de ajuste para cada material dependientes de estos dos parámetros.

A partir de los ajustes realizados para cada probeta, se generará una base de datos que nos permita obtener las características que nos aporta la curva de tracción. Dichas características son: el módulo de Young, la resistencia a la tracción y su correspondiente deformación, la resistencia a la fractura y su correspondiente deformación, el límite elástico y la longitud de la zona de fluencia (que en caso de no existir sería nula).



## 2. Materiales estudiados

---

Como existen infinidad de materiales, se han seleccionado algunos metales de interés de los cuales el departamento de Ingeniería y Ciencia de los Materiales y del Transporte disponía de suficiente información para caracterizarlos adecuadamente. Estos metales han sido: Acero C45, Acero 304, Aluminio 2011, Latón y Fundición gris.

A su vez, algunos de estos materiales se han sometido a distintos tratamientos térmicos, obteniendo probetas, por ejemplo, de Acero C45 normalizado, recocido, templado con revenido, etc. Dichas probetas se han sometido a ensayos de tracción a temperatura ambiente y a distintas velocidades, o a la velocidad de referencia y diferentes temperaturas. La longitud inicial de las probetas ha sido medida con un extensómetro y tiene un valor, igual para todas, de 50 mm. De ahí que la velocidad de referencia corresponda a 0.0125 mm/s, pues la velocidad recomendada por la norma para estos ensayos es de  $0.00025 \times L_0$ , con  $L_0$  la longitud inicial de la probeta.

A continuación, se presentan las probetas estudiadas para cada material y su nomenclatura.

### 2.1 Probetas de Acero C45

Para las probetas de Acero C45 se ha empleado la siguiente nomenclatura:

- N, para las probetas normalizadas.
- R, para las que se han sometido a un proceso de recocido.
- T para las que se han sometido a temple, como es el caso de las T01, T02, TE01 y TE02. Las probetas T03, T04, TB01 y TB02 han sido sometidas además sometidas a un revenido bajo; las T05, T06, TA01 y TA02 a un revenido alto; y las T07, Y08 y TR01 a un sobrerrevenido.

Para las probetas de acero C45 se han ensayado todas las probetas correspondientes a los ensayos de temperatura ambiente de la Tabla 2.1 y las de los ensayos a distintas velocidades de la Tabla 2.2.

Con las probetas de la Tabla 2.1, junto con las probetas N01 y N02 de la Tabla 2.1, se estudiará la sensibilidad del acero C45 ante cambios en la velocidad de trabajo del ensayo de tracción. No se ha podido estudiar la sensibilidad ante variaciones de temperatura porque no se pudieron realizar dichos ensayos.

**Tabla 2.1.** Probetas de acero C45 ensayadas a la velocidad recomendada (0.0125 mm/s).

<i>A temperatura ambiente</i>	
Recocido	R01, R02
Normalizado	N01, N02
Temple	T01, T02, TE01, TE02*
Temple + Revenido bajo	T03, T04, TB01, TB02*
Temple + Revenido alto	T05, T06, TA01, TA02 (reciclada)*
Temple + Sobrerrevenido	T07, T08, TR01 (reciclada)*
<i>A alta temperatura</i>	
Normalizado a 100 °C	N03, N04
Normalizado a 200 °C	N05, N06
Normalizado a 300 °C	N07, N08

**Tabla 2.2.** Probetas de acero C45 ensayadas a distintas velocidades.

<i>A temperatura ambiente</i>	
Normalizado a velocidad $(0.0067 \times Lo)$ mm/s = 0.3350 mm/s	N09, N10
Normalizado a velocidad $(0.002 \times Lo)$ mm/s = 0.1000 mm/s	N011, N012
Normalizado a velocidad $(0.00007 \times Lo)$ mm/s = 0.0035 mm/s	N013, N014

## 2.2 Probetas de Aluminio 2011

Para las probetas de Aluminio 2011 se ha empleado la siguiente nomenclatura:

- O, para las que se han sometido a un recocido total.
- H, para las que se han sometido a un recocido contra acritud
- O1, para las que se han sometido a un tratamiento de solubilización con enfriamiento lento en un horno.
- SH, para las que se han sometido a una solubilización más un hipertemple.
- T4, para las que se han sometido a una solubilización seguida de un hipertemple más una maduración natural.
- T6, para las que se han sometido a una solubilización seguida de un hipertemple más una maduración artificial.
- T7, para las que se han sometido a una solubilización seguida de un hipertemple más una sobremaduración.

De las probetas de aluminio se han ensayado, y por tanto simulado, todas las probetas de la Tabla 2.3, incluyendo las ensayadas a alta temperatura. Las probetas O1-01, O1-02 se ensayaron días después del tratamiento, mientras que las O1-03, O1-04 se ensayaron justo después del tratamiento.

Gracias a esto, se ha podido estudiar la sensibilidad de este material ante cambios de temperatura. Sin embargo, las probetas de la tabla 2.4 no han podido ser ensayadas, y por ello no se ha podido estudiar la sensibilidad del aluminio ante cambios en la velocidad de trabajo.

**Tabla 2.3.** Probetas de aluminio ensayadas a la velocidad recomendada (0.0125 mm/s).

<i>A temperatura ambiente</i>	
Recocido total (O)	O-01, O-02, O-03, O-04
Recocido contra acritud (H2)	H2-01, H2-02
Solubilización+ Enfriamiento lento en horno (O1)	O1-01, O1-02
Solubilización+ Hipertemple (SH)	SH-01, SH-02
Solubilización+ Hipertemple +Maduración Natural (T4)	T4-01, T4-02
Solubilización+ Hipertemple +Maduración Artificial (T6)	T6-01, T6-02
Solubilización+ Hipertemple +Sobremaduración (T7)	T7-01, T7-02
<i>A alta temperatura</i>	
T6 a 100 °C	T6-03, T6-04
T6 a 200 °C	T6-05, T6-06
T6 a 300 °C	T6-07, T6-08

**Tabla 2.4.** Probetas de aluminio ensayadas a distintas velocidades.

<i>A temperatura ambiente</i>	
T6 a velocidad $(0.0067 \times Lo)$ mm/s = 0.3350 mm/s	T6-09, T6-10
T6 a velocidad $(0.002 \times Lo)$ mm/s = 0.1000 mm/s	T6-11, T6-12
T6 a velocidad $(0.00007 \times Lo)$ mm/s = 0.0035 mm/s	T6-13, T6-14

## 2.3 Probetas de Acero 304

Para las probetas de Acero 304 no se ha empleado una nomenclatura específica, sino que las probetas se han diferenciado únicamente por su numeración, tal y como se muestra en las Tablas 2.5 y 2.6.

Las únicas probetas de las que se ha obtenido información son las correspondientes a las de temperatura ambiente de la Tabla 2.5. Por este motivo, ha sido imposible estudiar la sensibilidad ante cambios tanto en la temperatura como en la velocidad de trabajo.



**Tabla 2.5.** Probetas de acero 304 ensayadas a la velocidad recomendada (0.0125 mm/s).

<i>A temperatura ambiente</i>	
Estabilizadas en agua 1h*	A-01, A-02
Ensayo probeta de origen	A-03
Estabilizadas en salmuera 1h*	A-11, A-12
<i>A alta temperatura</i>	
100 °C	A-15 A-16
200 °C	A-17 A-18
300 °C	A-19

**Tabla 2.6.** Probetas de acero 304 ensayadas a distintas velocidades.

<i>A temperatura ambiente</i>	
(0.0067×Lo) mm/s = 0.3350 mm/s	A-04, A-05
(0.002×Lo) mm/s = 0.1000 mm/s	A-06, A-07
(0.00007×Lo) mm/s = 0.0035 mm/s	A-08, A-09

Las probetas estabilizadas se han introducido en el horno a 1060 °C durante 1 h y después se han templado en agua o salmuera. Se ha observado que se producen precipitados con la estabilización en agua, por tanto, se ha procedido a estabilizar en salmuera que también ha producido precipitados.

## 2.4 Probetas de Latón

Para las probetas de Latón tampoco se ha empleado una nomenclatura específica, sino que, de nuevo, se han diferenciado las probetas por su numeración, dado que no se dispone de probetas sometidas a distintos tratamientos térmicos. Esto se ve claramente en las Tablas 2.7 y 2.8.

**Tabla 2.7.** Probetas de latón ensayadas a la velocidad recomendada (0.0125 mm/s).

Ensayo a temperatura normal de partida	L-01, L-02
100 °C	L-09, L-10
200 °C	L-11, L-12
300 °C	L-13, L-14

Las probetas ensayadas y simuladas de latón se corresponden con las de temperatura ambiente de la Tabla 2.7 y todas las de la Tabla 2.8 (también ensayadas a temperatura ambiente). Para este material, se ha estudiado la sensibilidad frente a cambios en la velocidad de ensayo, puesto que no se dispone de datos para estudiar la sensibilidad ante cambios en la temperatura

**Tabla 2.8.** Probetas de latón ensayadas a distintas velocidades.

<i>A temperatura ambiente</i>	
$(0.0067 \times Lo) \text{ mm/s} = 0.3350 \text{ mm/s}$	L-03, L-04
$(0.002 \times Lo) \text{ mm/s} = 0.1000 \text{ mm/s}$	L-05, L-06
$(0.00007 \times Lo) \text{ mm/s} = 0.0035 \text{ mm/s}$	L-07, L-08

## 2.5 Probetas de Fundición gris

Del mismo modo que ocurría para el Latón, las probetas de Fundición gris se han diferenciado en base a su distinta numeración, sin emplear una nomenclatura específica. Las probetas disponibles se muestran en las Tablas 2.9 y 2.10.

**Tabla 2.9.** Probetas de Fundición gris ensayadas a la velocidad recomendada (0.0125 mm/s).

Ensayo a temperatura normal de partida	F-01, F-02
100 °C	F-09, F-10
200 °C	F-11, F-12
300 °C	F-13, F-14

**Tabla 2.10.** Probetas de Fundición gris ensayadas a distintas velocidades.

<i>A temperatura ambiente</i>	
$(0.0067 \times Lo) \text{ mm/s} = 0.3350 \text{ mm/s}$	F-03, F-04
$(0.002 \times Lo) \text{ mm/s} = 0.1000 \text{ mm/s}$	F-05, F-06
$(0.00007 \times Lo) \text{ mm/s} = 0.0035 \text{ mm/s}$	F-07, F-08

Las probetas ensayadas son las de temperatura ambiente de la Tabla 2.9 y todas las de la Tabla 2.10. Por lo tanto, de nuevo, ha podido estudiarse la sensibilidad de este material ante cambios en la velocidad de trabajo del ensayo de tracción, pero no ante cambios en la temperatura.

Durante la caracterización de este metal se ha observado que la fundición posee matriz perlítica.

## 3. Procedimiento experimental

### 3.1 Realización de los ensayos

Los ensayos de tracción fueron llevados a cabo con ayuda de una máquina universal de ensayos de 100 kN (modelo Instron 5505) y fueron realizados en anteriores trabajos a este. Todos los tratamientos térmicos que fueron aplicados a las distintas probetas también fueron realizados en los laboratorios del Dpto. de Ingeniería y Ciencia de los Materiales y del Transporte.

### 3.2 Método de ajuste empleado

Se ha empleado la herramienta de Visual Basic de Excel para desarrollar el simulador. Se ha elegido este programa debido a su simplicidad, que permite que cualquier persona que sepa utilizar las herramientas básicas de Excel lo ejecute sin necesidad de tener conocimientos de programación. Debido a que el objetivo de este simulador es servir de herramienta para que cualquier usuario pueda ensayar un material, que fuera un programa fácil era esencial, y esto es característico de las macros de Excel. En el siguiente apartado se detallan los pasos a seguir para realizar una simulación. Puede observarse la hoja Excel de simulación en la Fig. 3.1.

	A	B	C	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	e [fracción]	s [MPa]	s_eval		p1	p2	p3	p4	p5				
2					0.018	26601.717	0.1456	695.1715	0.2273				
3					eLE	EY	eM	sM	n				
4													
5					SSE	SST	Núm Datos		Cero	R2			
6					0	#DIV/0!	0		0	#DIV/0!			
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14													
15													
16													
17													
18													
19													
20													
21													
22													
23													
24													
25													
26													
27													
28													

Borrar
--------

Procesa
---------

Datos conocidos	
def	
eF	
sF	
sLEinf	

Función	1	Nº Paráms	5
---------	---	-----------	---

1	Tensión(#{p1,p2,p3,p4,p5,\$Q\$7:\$Q\$10})			
2				
3				
4				
5				
6				

Memorias				
M1	M2	M3	M4	M5

Subfunciones	
F1	
F2	
F3	
F4	
F5	

Figura 3.1. Hoja Excel de Simulación.

Para obtener el ajuste se ha dividido la curva  $e$ - $s$  en cuatro zonas: la elástica, la de fluencia y la plástica uniforme y la plástica no uniforme. Cada tramo se enlaza con el siguiente mediante una función sigmoideal (un escalón gradual) cuyo centro y anchura son reconfigurables. Se

garantiza así que los empalmes no solo son continuos, sino también suaves (esto es con al menos la primera derivada continua). La primera zona es la más fácil de modelar, pues es prácticamente lineal. Por otro lado, la región de fluencia se ha modelado mediante una sinusoidal con periodo en función de la longitud de esta zona y amplitud en función de su tensión. Por último, las dos zonas de comportamiento plástico se han aproximado por sendas polinómicas; una de grado  $n$  anterior al punto de tensión máxima y otra de segundo grado para la región posterior hasta la fractura. En una primera estrategia el valor de  $n$  era calculado internamente; en la segunda estrategia se ha preferido dejar libre, como parámetro ajustable.

Los ajustes se han definido mediante macros ejecutables que apelan, como motor de optimización matemático, a la herramienta SOLVER que incorpora Excel. Se ejecuta con la pulsación de un botón, también definido en Visual Basic. Además del botón que ejecuta la macro, se ha definido otro para borrar los datos precedentes y que no se produzcan errores al realizar varias simulaciones consecutivamente.

Inicialmente, además de los datos de deformación y esfuerzo obtenidos por la máquina del ensayo, se le deben proporcionar al programa los siguientes parámetros: longitud de la zona de fluencia ( $def$ ), resistencia a la rotura ( $s_F$ ) y deformación a la rotura ( $e_F$ ). Estos tres valores no serán recalculados por el programa, por lo que es conveniente obtenerlos correctamente mediante lectura directa desde el gráfico  $e-s$  obtenido a partir de los datos proporcionados por la máquina. Estos datos se obtienen gráficamente de la curva de tracción real (Fig. 1.1). Véase la Fig. 3.2 para saber en qué parte de la hoja de simulación deben introducirse.

Datos conocidos	
def	
eF	
sF	

**Figura 3.2.** Introducción de datos conocidos en la versión inicial del programa.

También pueden especificarse la resistencia a la tracción ( $s_M$ ), la deformación máxima ( $e_M$ ), la deformación en el límite elástico ( $e_{LE}$ ) y la tensión a la que se produce la zona de fluencia ( $s_{LE,inf}$ ). Estos sí son recalculados por el programa, pero unos buenos valores iniciales ayudan a que la simulación se ejecute en el menor tiempo posible. Una vez especificados estos datos, se pulsa el botón *Procesa* que ejecuta la macro de ajuste y se obtiene una curva  $e-s_{evaluada}$ . En la Fig. 3.3 se muestra la parte de la hoja de simulación de la primera versión del programa donde se introducen los datos que se acaban de comentar. Visualmente, las imágenes mostradas en la Fig. 3.2 y en la Fig. 3.3 son las únicas diferencias entre las dos versiones del programa.

p1	p2	p3	p4	p5
0.002	210.000	0.3000	400.0000	
<i>eLE</i>	<i>sLEinf</i>	<i>eM</i>	<i>sM</i>	

**Figura 3.3.** Datos calculados por la primera versión del programa.

Para conseguir un mejor ajuste de la zona plástica, en una segunda versión del programa el parámetro  $s_{LE,inf}$  se estableció como valor fijo y se añadió el parámetro  $n$  para que fuera calculado a partir de un valor inicial, del mismo modo que los mencionados anteriormente. El significado de  $n$ , ya mencionado previamente, tiene que ver con la curvatura de la función de ajuste de la primera zona de deformación plástica. Esta nueva versión es la que se muestra en la Fig. 3.1.

### 3.3 Procedimiento de introducción de datos y simulación

#### Datos en bruto

Durante la realización de un ensayo de tracción, la máquina adquiere y registra datos relativos al estiramiento de la muestra, así como de la carga (fuerza) ejercida en cada instante para conseguir dicha deformación. El muestreo se efectúa con una frecuencia suficientemente alta, mayor de la requerida, por lo que la nube de datos adquirida puede ser cribada si se desea para manipular un menor número de puntos.

En trabajos previos se realiza con todos los correspondientes ensayos que en el presente trabajo se someterán a análisis. Los datos en bruto proporcionados por la máquina son procesados para obtener de ellos la deformación ingenieril ( $e$ ) y el esfuerzo ingenieril ( $s$ ).

Los datos necesarios para realizar la simulación han sido los de deformación (en formato fraccional) y los de resistencia a la tracción (en MPa), el resto se obtiene a partir de la curva que se forma con estos dos parámetros. Para obtener dichos valores los técnicos de laboratorio del departamento de Ciencia de los Materiales realizaron distintos ensayos con probetas de diferentes metales, a distintas temperaturas y velocidades de trabajo. Estos datos venían recogidos de la forma que se observa en la Fig. 3.3.

	A	B	C	D	E
14	Probeta		1		
15	Anchura:		5 mm		
16	Espesor:		5 mm		
17	Longitud:		50 mm		
18	Diámetro:		8.01 mm		
19	Diámetro int:		0.5 mm		
20	Diámetro ext:		1 mm		
21	Espesor pared:		0.5 mm		
22	Área:		50.391224 mm*mm		
23	Densidad lineal:		1 den		
24	Peso de pat[...]:		9.80665 N		
25	Separa. rodillos de carga:		0 mm		
26	Separa. rodillos de soporte:		1 mm		
27	Separación rodillos:		2		
28	Tipo fijación:	3-point			
29	Observaciones:				
30	Incluidas				
31	Tiempo sec	Extensión mm	Deformación 1 %	Carga N	Resistencia a la tracción MPa
32	0		-0.000227483	2381.248	47.25522
33	0.1	0.00072	-0.000549763	2381.145	47.25317
34	0.2	0.00192	0.000434595	2379.346	47.21748

**Figura 3.4.** Formato de datos en bruto proporcionados por la máquina del ensayo de tracción.

La deformación reflejada en las tablas de datos de estos ensayos estaba expresada en tanto por ciento, por lo que fue convertida a tanto por uno dividiendo entre cien. Además, algunas probetas presentaban valores iniciales de deformación negativos. Estos valores, junto con su correspondiente resistencia, fueron eliminados a la hora de seleccionar el conjunto de datos que se insertaría en la hoja de Excel para su posterior ajuste. También fueron eliminados algunos valores de resistencia (y su correspondiente pareja de deformación) que habían sido almacenados tras la rotura del material. En algunos casos, estos eran fácilmente reconocibles porque se producía una reducción brusca del valor de la tensión, muy distinta de la evolución gradual y continua observada a lo largo del resto de la curva.

### Extracción de parámetros mecánicos mediante ajuste por mínimos cuadrados

A partir de los datos del laboratorio, se realizaron distintos ficheros para cada metal, con subcarpetas para cada probeta. Para cada tabla de datos obtenida (de esfuerzo vs deformación), se realizó una simulación, de forma que pudiera estudiarse el grado de ajuste conseguido para cada tipo de comportamiento, ya que cada metal presentaba una curva  $e-s$  diferente. El factor que más ha marcado la diferencia entre las curvas de los distintos ensayos ha sido la existencia o no de una zona de fluencia. Estos ajustes se presentan en el capítulo 4.

A la hora de ejecutar la simulación, era necesario fijar ciertos parámetros. Entre ellos, algunos serían modificados por el programa, sirviendo simplemente como punto de partida (los cinco parámetros de la parte superior de la Fig. 3.1). Otros parámetros, sin embargo, requerían una mayor precisión, pues una vez impuestos el programa no los modificaba (los *datos conocidos* de la Fig. 3.1). Esto ya ha sido expuesto en el apartado anterior.

Una vez metidos todos estos datos, se ejecutaba la simulación, que devolvía una columna de valores de tensión “evaluada” y, en el mismo gráfico donde estaba representada la curva  $e-s$  real, dibujaba la del ajuste. Se ha evaluado la exactitud del método de ajuste en función de la comparación visual de dichas curvas, además de con el valor de  $R^2$ .

### Base de datos

Durante el proceso de ajuste, para aquellas probetas para las que se lograba un buen ajuste fueron añadidas a una base de datos. Para cada material (por ejemplo, el acero C45 normalizado), se creó una base de datos incluyendo todas las probetas de este tipo, representando todas las características en función de la temperatura y/o la velocidad de ensayo. Estas representaciones serán expuestas más adelante. También fueron representadas tanto las curvas  $e-s$  de todas las probetas de cada material en conjunto como las  $e-s$  evaluada. Una vez realizados estos ensayos, se creó un archivo de Excel para cada metal, en el que aparecía la información relativa a deformación y resistencia a la tracción de cada una de las probetas ensayadas, entre otras características mecánicas. El formato de estas bases de datos puede observarse en la Fig. 3.4.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	vel [mm/sec]	EY [MPa]	eLE [.]	eM [.]	eF [.]	def [.]	sLEinf [Mpa]	sM [MPa]	sF [MPa]	n[.]	
2	0.0125	26834.2	0.01827	0.145439	0.240114	0.016	405	695.1855	572.5802	0.227948	Acero C45 -N01
3	0.0125	16273206	2.54E-05	0.120987	0.209776	0.0136	424	698.273	581.6411		Acero C45 -N02
4	0.335	242388.8	0.001907	0.112376	0.215772	0.014	444	730.31	589.222	0.19793	Acero C45 -N09
5	0.335	235085	0.001897	0.114136	0.216059	0.014	437.3	708.0989	567.5838	0.192884	Acero C45 -N10
6	0.335	238736.9	0.001902	0.113256	0.215915	0.014	440.65	719.2045	578.4029		Media N-09,N-10
7	0.1	237515.3	0.001883	0.110287	0.208841	0.0138	424.5	705.6796	580.2507	0.196296	Acero C45 -N11
8	0.1	243224.6	0.001863	0.116143	0.221679	0.01281	421.4	709.6816	574.363	0.195975	Acero C45 -N12
9	0.1	240370	0.001873	0.113215	0.21526	0.013305	422.95	707.6806	577.3069		Media N-11,N-12
10	0.0035	251814.5	0.001691	0.114401	0.206871	0.01256	424.86	709.7676	584.3083	0.201055	Acero C45 -N13
11	0.0035	248898.9	0.001774	0.11761	0.210947	0.0132	417.1	699.7309	576.0464	0.195882	Acero C45 -N14
12	0.0035	250356.7	0.001733	0.116006	0.208909	0.01288	420.98	704.7492	580.1774		Media N-13,N-14
13											
14	vel [mm/sec]	EY [MPa]	eLE [.]	eM [.]	eF [.]	def [.]	sLEinf [Mpa]	sM [MPa]	sF [MPa]		vn [.]
15	0.0125	26834.2	0.01827	0.145439	0.240114	0.016	405	695.1855	572.5802		1
16	0.335	238736.9	0.001902	0.113256	0.215915	0.014	440.65	719.2045	578.4029		26.8
17	0.1	240370	0.001873	0.113215	0.21526	0.013305	422.95	707.6806	577.3069		8
18	0.0035	250356.7	0.001733	0.116006	0.208909	0.01288	420.98	704.7492	580.1774		0.28

**Figura 3.5.** Formato de las bases de datos para materiales ensayados a distintas velocidades.

En la Fig. 3.4, las filas subrayadas en verde representan los datos seleccionados, que, por lo general, se obtienen haciendo la media de los datos obtenidos para cada par de probetas iguales. En caso de que una de las probetas presentara grandes errores, se tomaba como correcta la otra probeta de la pareja directamente.

## **Estudio de sensibilidades**

A partir de las bases de datos de cada material, se ha estudiado la sensibilidad: frente a la temperatura para aquellos materiales de los que se tenían probetas ensayadas a alta temperatura y frente a la velocidad para aquellos materiales de los que se disponía de probetas ensayadas a distintas velocidades. Estas sensibilidades se presentan en el capítulo 4.

### **3.4 Ajuste polinómico**

Para evaluar las sensibilidades de los distintos materiales, se han representado los parámetros más importantes (esfuerzo máximo y la deformación que produce, deformación y esfuerzo a la rotura, límite elástico, etc.) frente a la velocidad o a la temperatura. Ambos ejes han sido normalizados con respecto al valor obtenido a la velocidad de referencia o a temperatura ambiente, según la sensibilidad que se estuviera estudiando.

Para estudiar de manera más profunda las sensibilidades, se ha obtenido el polinomio de tendencia de cada parámetro. De este modo, se podrá predecir el comportamiento de los materiales estudiados, pero en otras condiciones de velocidad o de temperatura. Para obtener estos polinomios, simplemente se ha añadido la línea de tendencia a cada gráfico en Excel. El grado de este polinomio puede estar entre 1 (si es una recta) y 3.

En la mayoría de los casos, el polinomio de grado 3 es el que presenta un mayor valor de  $R^2$ , pero no es el que mejor representa la tendencia de los parámetros, ya que esta suele ser prácticamente lineal para el intervalo de temperaturas y velocidades estudiado. Por eso mismo, los polinomios de primer y segundo grado son más representativos de las sensibilidades presentadas en este documento.

En las líneas futuras, sería interesante emplear un programa que obtuviera directamente el polinomio de ajuste más adecuado, sin necesidad de elección del usuario. Esto será realizado una vez que se asegure que el modulado de la curva de tracción es el mejor que se puede obtener, lo cual no se corresponde con este caso, en el que se comentarán los fallos del programa y las posibilidades de mejora.



## 4. Análisis de resultados

### 4.1 Acero C45

#### Ajustes realizados

En este apartado se exponen los gráficos obtenidos de las simulaciones realizadas con las probetas de Acero C45. En todas las figuras, la curva de color azul representa la curva real  $e-s$  obtenida por la máquina del ensayo, mientras que la rosa es la evaluada mediante el programa de simulación. La nomenclatura empleada es la expuesta en el capítulo 2.

Se va a comenzar por las probetas de Acero C 45 normalizado, pues fueron ensayadas primero.

Las probetas de la Fig. 4.1 y la Fig. 4.2 se han sometido al mismo tratamiento y a las mismas condiciones de tracción (temperatura ambiente a 0.0125 mm/s), por lo que sus curvas  $e-s$  deberían ser exactamente iguales. Sin embargo, un posible fallo durante el registro de datos ha provocado la ausencia de los datos del inicio de la prueba en el caso de la probeta N-02, por lo que las curvas difieren. De hecho, este fallo también ha provocado que el programa no sea capaz de aproximar la curva de tracción de dicha probeta, como puede observarse en la Figura 4.2.

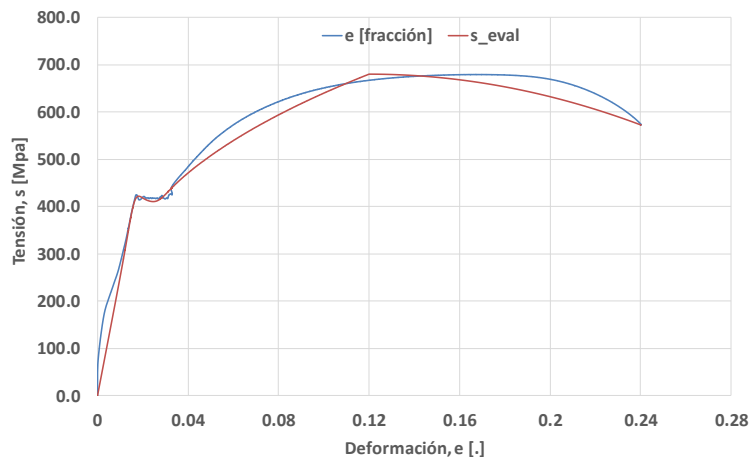
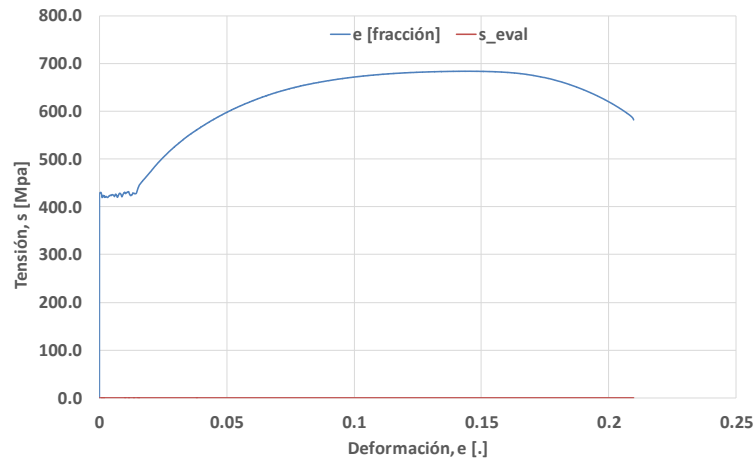
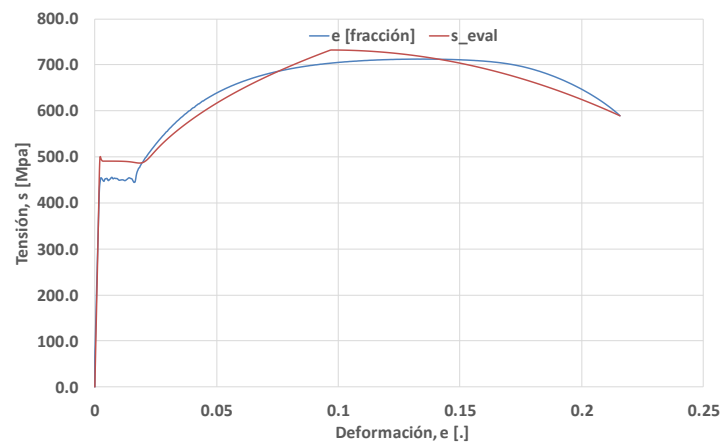


Figura 4.1. Tracción del Acero C45 N-01.

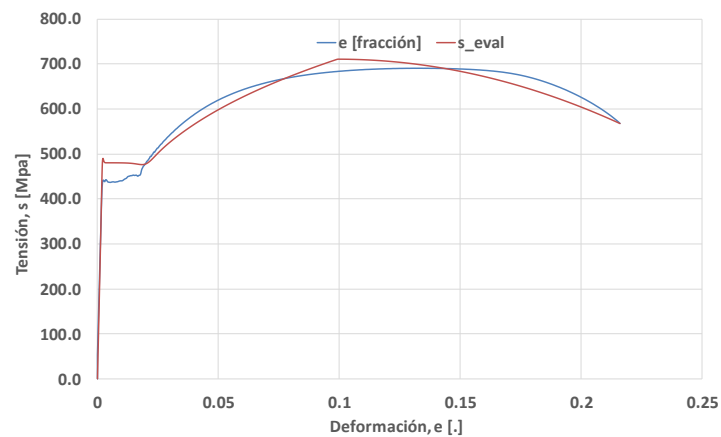


**Figura 4.2.** Tracción del Acero C45 N-02.

La Fig. 4.3 y la Fig. 4.4 también corresponden a dos probetas iguales a temperatura ambiente, pero, esta vez, ensayadas a una velocidad de 0.335 mm/s. Puede observarse que la predicción del simulador no ajusta bien la zona de fluencia.

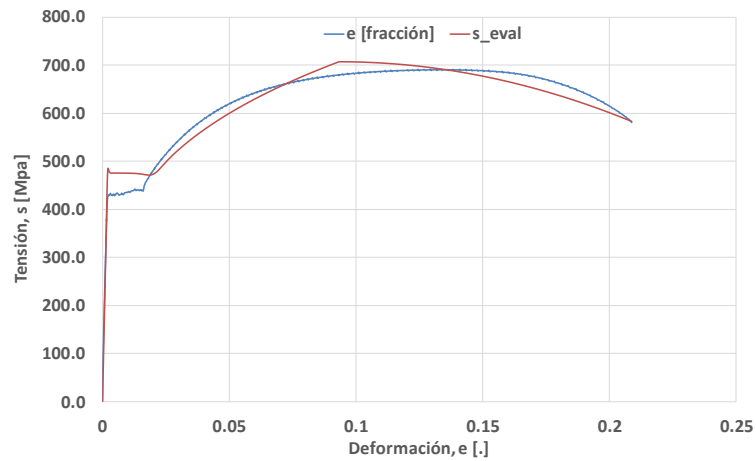


**Figura 4.3.** Tracción del Acero C45 N-09.

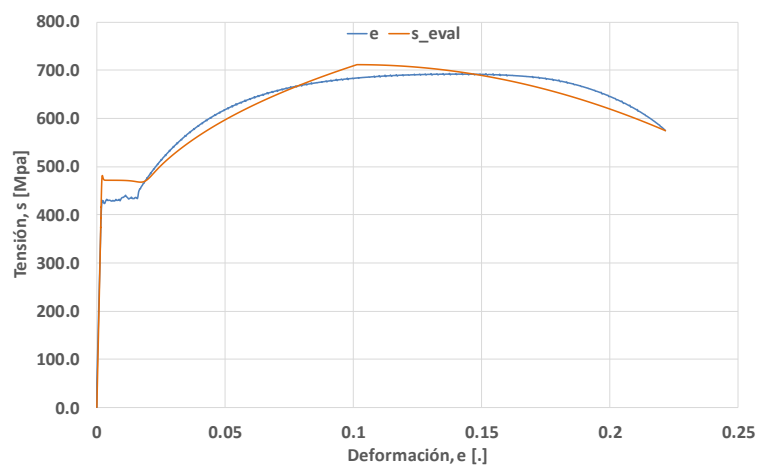


**Figura 4.4.** Tracción del Acero C45 N-010.

Lo mismo ocurre con la Fig. 4.5 y la Fig. 4.6, que en este caso se corresponden con probetas ensayadas a temperatura ambiente y a 0.1 mm/s.

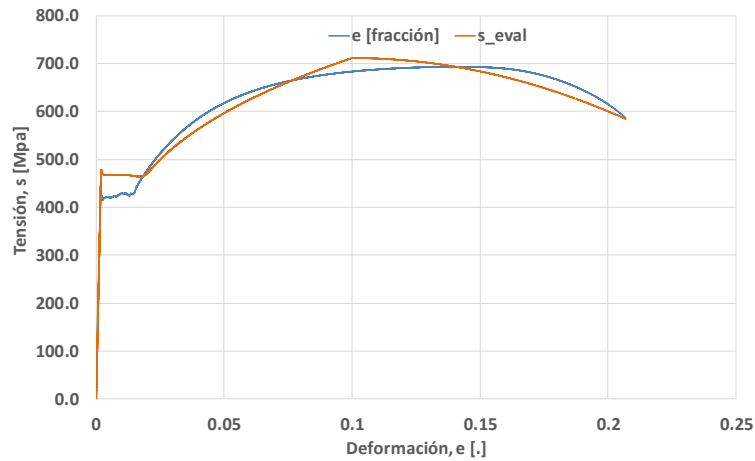


**Figura 4.5.** Tracción del Acero C45 N-011.

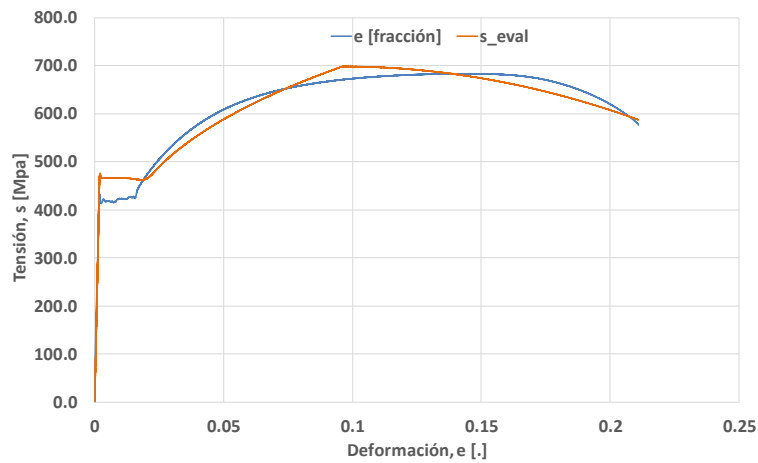


**Figura 4.6.** Tracción del Acero C45 N-012.

La Fig. 4.7 y la Fig. 4.8 representan la última tanda de probetas de acero C45 normalizado ensayadas a temperatura ambiente, en su caso a 0.0035 mm/s. Del mismo modo que en las anteriores figuras, se observa que el ajuste no es apropiado en la zona de fluencia y que tampoco se obtiene un valor correcto de tensión máxima.



**Figura 4.7.** Tracción del Acero C45 N-013.

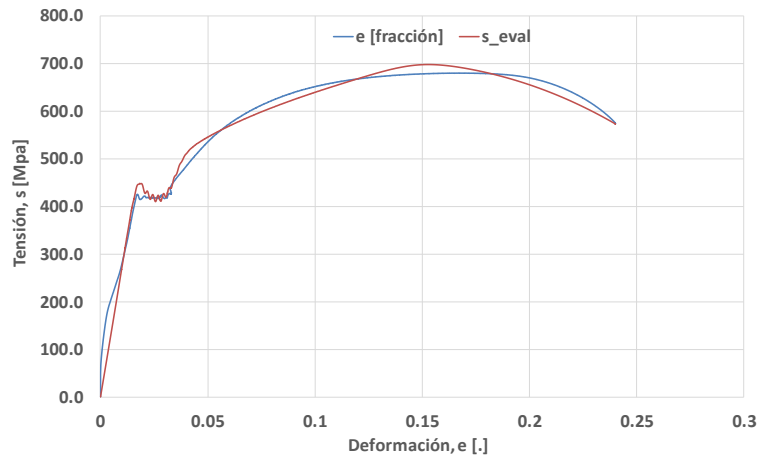


**Figura 4.8.** Tracción del Acero C45 N-014.

Las desviaciones más llamativas observadas en todas estas figuras (4.1-4.8) se producen en la zona de fluencia, pero tampoco la curvatura de la zona de deformación plástica se reproduce fielmente. No obstante, la tendencia de las curvas reales en su conjunto, sí que se puede considerarse adecuada.

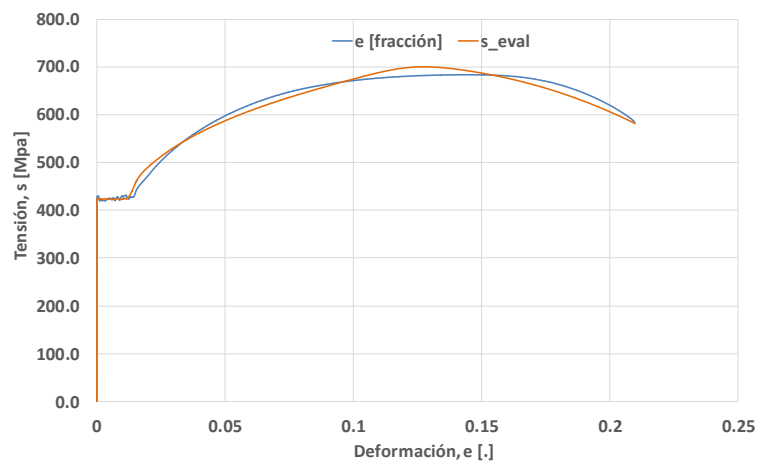
Estas desviaciones han obligado a reprogramar el simulador de la curva para dejar libre el parámetro  $n$  relacionado con la curvatura de la zona de deformación plástica, y a cambiar de estrategia de ajuste, fijando ahora el valor de la tensión de fluencia.

Todas las curvas de tracción mostradas anteriormente han sido reajustadas con esta nueva versión del simulador y los resultados han sido los que se exponen a continuación.



**Figura 4.9.** Nuevo ajuste Acero C45-N01.

Como puede observarse en la Fig. 4.9, la zona de fluencia se ajusta casi perfectamente empleando esta nueva versión del programa de ajuste, ya que se ha fijado el valor de la tensión de fluencia. Aun así, el punto máximo continúa reproduciéndose erróneamente.

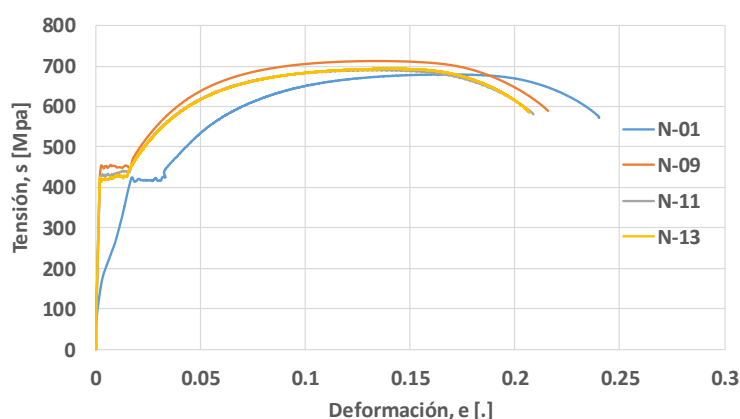


**Figura 4.10.** Nuevo ajuste Acero C45-N02.

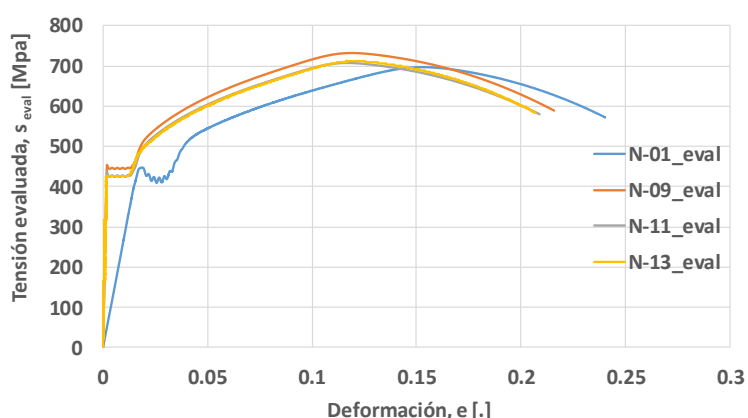
Además de lo comentado para la Fig. 4.9, se puede comprobar que se ha logrado simular la curva de tracción de la probeta N-02 (Fig. 4.10), que con la primera versión de ajuste no se había podido evaluar. A pesar de que se consigue ajustar la curva de la Fig. 4.10, este ensayo se ha descartado, puesto que los datos de la zona elástica se desconocen y el programa ha inventado unos que no tienen por qué ser próximos a los reales. (En cualquier caso, esto evidencia la mayor flexibilidad del nuevo simulador). Para obtener una curva del ensayo de dicha probeta que fuera fiable, debería desplazarse hacia la derecha y emplear los datos de la zona elástica correspondiente a la probeta de la Fig. 4.9.

Se ha realizado una representación conjunta de todas las probetas de acero C45 normalizado, de forma que se pueda observar el grado de reproducibilidad que se ha logrado con el nuevo ajuste. Para esta representación, solo se ha tomado una probeta para cada par de condiciones de ensayo, de forma que se han seleccionado las curvas de las probetas N01, N09, N011 y N013. El conjunto de curvas reales se muestra en la Fig. 4.11, mientras que las simuladas aparecen en la Fig. 4.12.

Además, visto que con esta nueva versión del ajuste se obtenían mejores resultados, a partir de este momento todos los materiales se han ajustado con esta versión. Sin embargo, para el C45 normalizado solo se muestra el ajuste de las probetas N-01 y N-02, a modo de comprobación de esta mejora, aunque se han ajustado de nuevo todas las probetas para mejorar la base de datos.



**Figura 4.11.** Conjunto de tracciones reales N-01, N-09, N-11, N-13.



**Figura 4.12.** Conjunto de tracciones evaluadas N-01, N-09, N-11, N-13.

Comparando la Fig. 4.11 y la Fig. 4.12, se deduce que, a pesar de que el ajuste no reproduzca el punto máximo de manera correcta, las tendencias de las curvas simuladas sí se corresponden con las de las curvas reales.

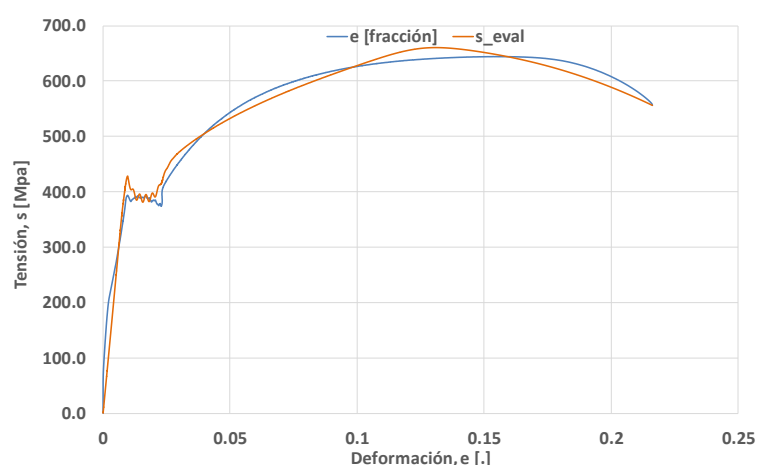
Mientras que mediante la primera versión del simulador se obtuvo un valor promedio del coeficiente de determinación  $R^2$  de 0.96, con la nueva versión este valor aumenta a 0.98, luego el error cometido disminuye. En la Tabla 4.1 se muestra el valor de  $R^2$  obtenido para cada probeta de Acero C45 normalizado ajustada con la primera versión del programa y con la segunda versión ( $R^2_1$  y  $R^2_2$ ).

**Tabla 4.1.** Valor de  $R^2$  obtenido para el ajuste de cada probeta de Acero C45.

Probeta	N-01	N-02	N-09	N-10	N-11	N-12	N-13	N-14
$R^2_1$	0.9568	-	0.9725	0.9741	0.9715	0.9725	0.9706	0.9717
$R^2_2$	0.9771	0.9789	0.9851	0.9857	0.9864	0.9842	0.9842	0.9842

A partir de aquí, todas las probetas se han ensayado con la nueva versión del simulador.

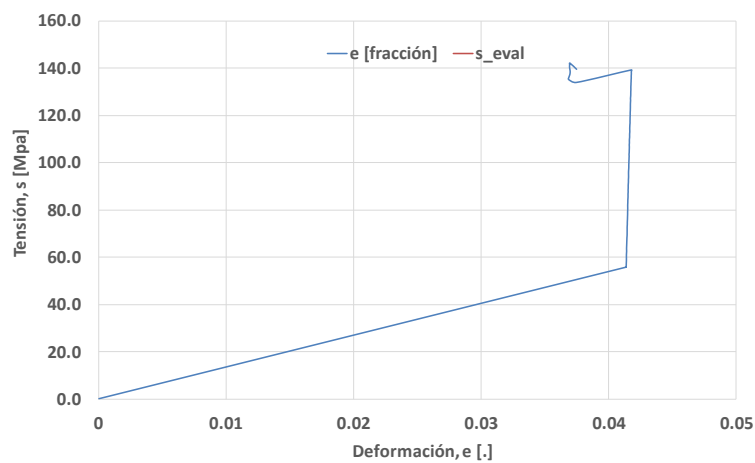
La Fig. 4.13 representa la curva de tracción de la probeta R-01 de acero C 45 recocido. No se ha representado la probeta R-02, porque es igual que la R-01. En este caso, se puede observar que el mayor error se comete en la determinación del punto de tensión (esfuerzo) máxima. Una posible forma de solventar este problema sería forzar el valor de este punto añadiendo restricciones al sistema. Esto se realiza agregando restricciones en la herramienta SOLVER de Excel (que es el motor que realiza el trabajo duro de la optimización de los parámetros ajustables).



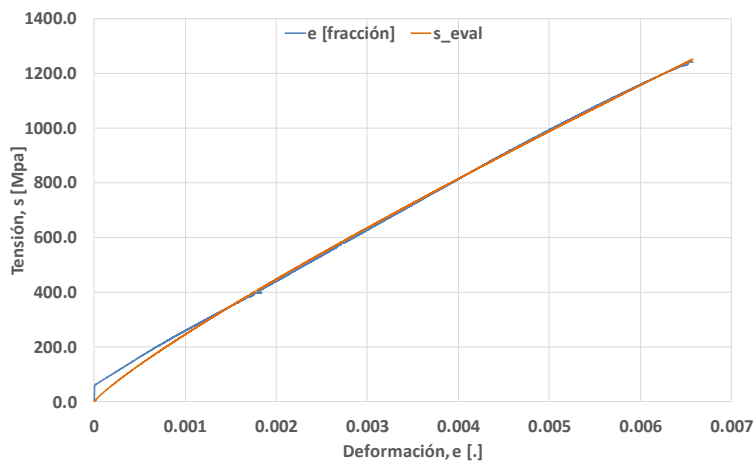
**Figura 4.13.** Tracción Acero C45-R-01.

Otro fallo del programa es el pico inicial de la región de fluencia (el límite elástico), que no termina de ajustarse perfectamente, tal y como se observa en la Fig. 4.13.

A continuación, se muestran los ajustes de las tracciones de las probetas sometidas a temple. Algunas no han podido ajustarse debido a que la curva obtenida a partir de los datos reales de esfuerzo y deformación proporcionados por la máquina de tracción no eran válidos. Este es el caso de las probetas T-01, T-02, T-03, T-04 y TE-01. A modo de demostración de que estas curvas no son válidas, se han representado las curvas T-01 (Fig. 4.14) y TE-01 (Fig. 4.15).



**Figura 4.14.** Tracción Acero C45-T-01.

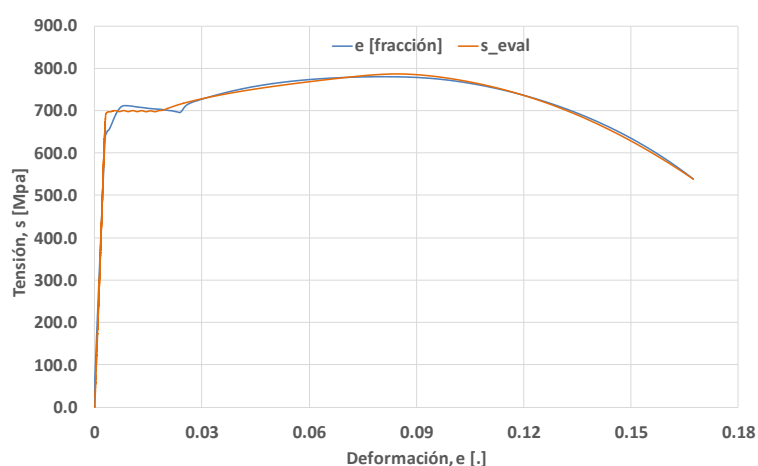


**Figura 4.15.** Tracción Acero C45-TE-01.

Claramente, las curvas representadas en la Fig. 4.14 y la Fig. 4.15 no sirven como curva  $e$ - $s$  de tracción, pues no se corresponden con la forma de curva que se presentó en la Fig. 1.1. Las

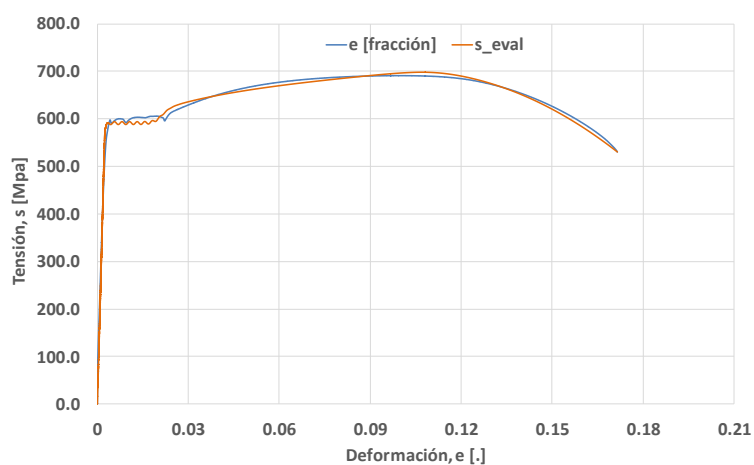


probetas que han sido sometidas a un tratamiento de temple y sí son válidas se representan a continuación. Solo se muestra la curva de una de las probetas de cada pareja de estas que son iguales. Estas parejas (sometidas a los mismos tratamientos y a las mismas condiciones de ensayo) se pueden ver perfectamente en el capítulo 2 de esta memoria, donde se muestra la nomenclatura empleada para las probetas y sus características.



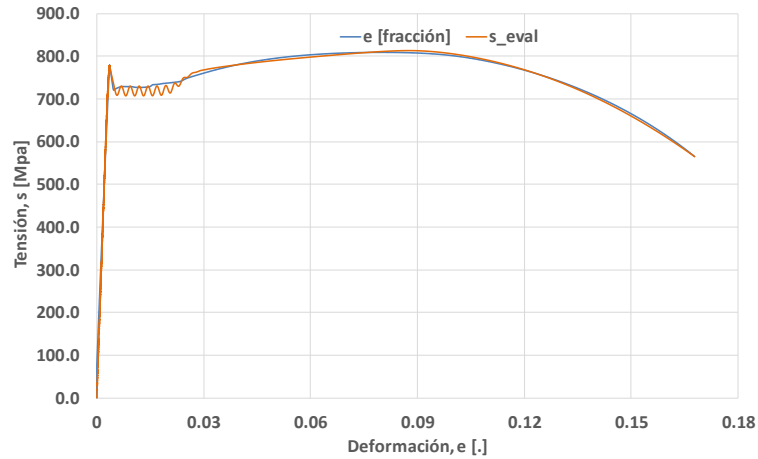
**Figura 4.16.** Tracción Acero C45-T-05.

La curva de tracción de la Fig. 4.16 muestra un ajuste realizado muy satisfactoriamente, ya que la región plástica de ambas curvas (la real y la evaluada) coinciden perfectamente. Además, en la región de fluencia, a pesar de que los picos no se han reproducido correctamente, tampoco se obtiene un error demasiado grande, con un  $R^2$  de 0.98974. Lo mismo ocurre con el ajuste mostrado en la Fig. 4.17, para el que se ha obtenido un valor de  $R^2$  de 0.98346.



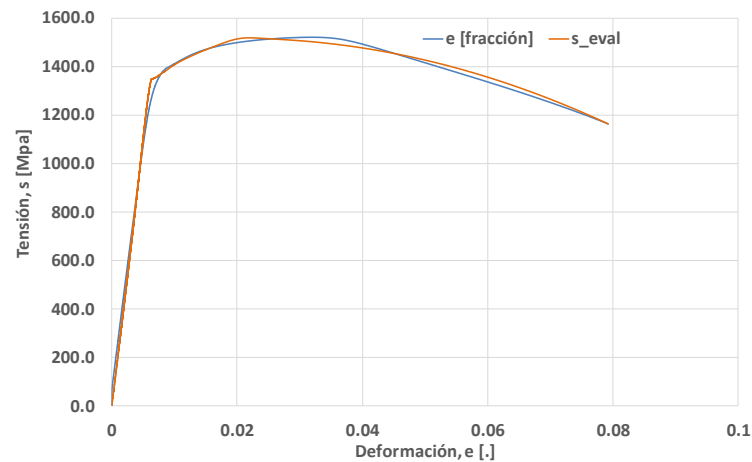
**Figura 4.17.** Tracción Acero C45-T-07.

En la Fig. 4.18 se ve un ajuste muy bueno para la probeta TA-01, que ha sido sometida a un temple seguido de un revenido alto. En este caso, el pico inicial de la región de fluencia también se ha ajustado bien. De hecho, para este ajuste se ha obtenido un valor de  $R^2$  de 0.988.



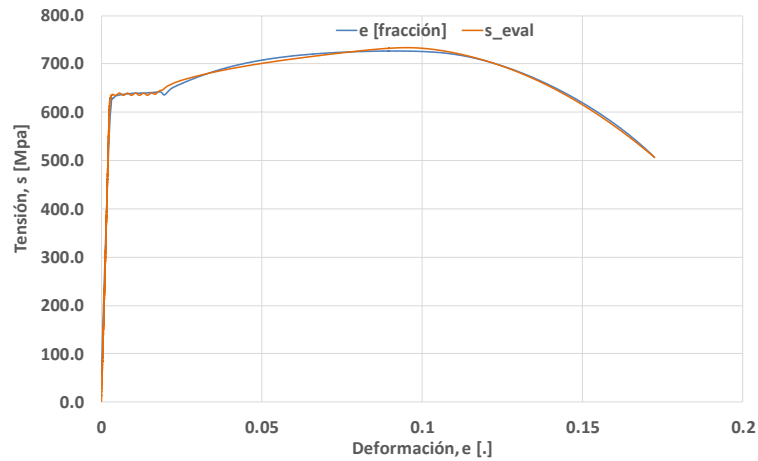
**Figura 4.18.** Tracción Acero C45-TA-01.

La probeta de la Fig. 4.19, sin embargo, se sometió a un temple seguido de un revenido bajo, y no presenta región de fluencia. Es por eso por lo que se obtiene un  $R^2$  de 0.993, mayor que el anterior debido a que ya no existe ese error en la región de fluencia.



**Figura 4.19.** Tracción Acero C45-TB-01.

Para la probeta TR-01, el ajuste es aún mejor, habiendo obtenido un valor de  $R^2$  de 0.992. Como se puede observar en la Fig. 4.20, las curvas son prácticamente iguales.



**Figura 4.20.** Tracción Acero C45-TR-01.

### Sensibilidad del Acero C45 con respecto a la velocidad de ensayo

A continuación, se va a estudiar la sensibilidad del Acero C45 a la velocidad de ensayo. Para ello, se han tomado solo las probetas normalizadas, ya que, tal como se vio en el capítulo 2, estas son las probetas que se han ensayado a distintas velocidades. Todas estas probetas se han ensayado a temperatura ambiente.

Como se explicó en el capítulo 3, de cada material se realizó una base de datos con los parámetros más importantes obtenidos para cada probeta. Estos parámetros son de los que se va a estudiar la tendencia con la variación de la velocidad, es decir, la sensibilidad con respecto a la velocidad de ensayo. De cada pareja de probetas iguales se realizó la media de cada parámetro, de forma que se obtuvo un valor medio de cada uno de ellos para cada velocidad de trabajo. Estos valores, para el Acero C45, se muestran en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2.** Datos recogidos de los ensayos de tracción realizados con las probetas de Acero C45 a distintas velocidades.

vel [mm/s]	EY [MPa]	eLE [.]	eM [.]	eF [.]	def [.]	sLEinf [Mpa]	sM [MPa]	sF [MPa]	n[.]
0.0125	26834.2	0.0183	0.1454	0.2401	0.0160	405	695.19	572.58	0.2279
0.335	238736.9	0.0019	0.1133	0.2159	0.0140	440.65	719.20	578.40	0.1954
0.1	240370	0.0019	0.1132	0.2153	0.0133	422.95	707.68	577.31	0.1961
0.0035	250356.7	0.0017	0.1160	0.2089	0.0129	420.98	704.75	580.18	0.1985

Con el fin de estudiar la sensibilidad al mismo que tiempo que se obtienen los polinomios de tendencia de todos estos parámetros, los valores de la Tabla 4.2 se han normalizado,

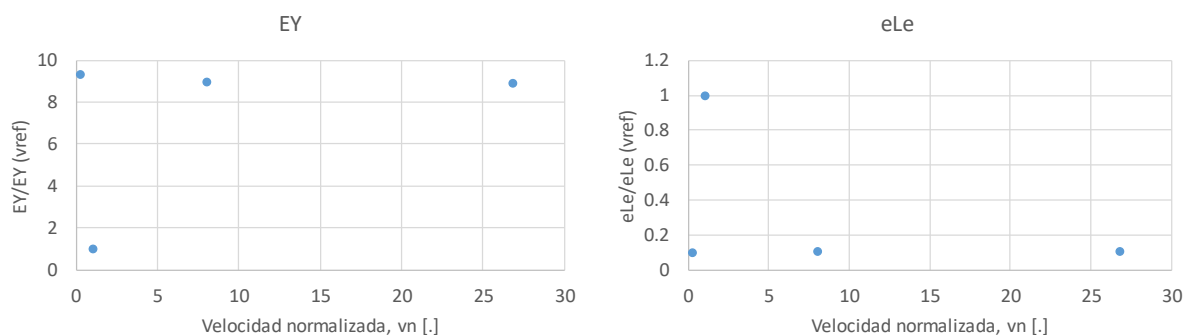
dividiendo cada dato por el correspondiente a la velocidad de referencia (0.0125 mm/s). Los datos normalizados se muestran en la Tabla 4.3, donde  $v_n$  representa la velocidad normalizada.

**Tabla 4.3.** Datos recogidos de los ensayos de tracción realizados con las probetas de Acero C45 a distintas velocidades normalizadas.

vel [mm/s]	EY [MPa]	eLE [.]	eM [.]	eF [.]	def [.]	sLEinf [Mpa]	sM [MPa]	sF [MPa]	n[.]	$v_n$ [.]
0.0125	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.335	8.897	0.1041	0.7787	0.8992	0.8750	1.088	1.035	1.010	0.8572	26.8
0.1	8.958	0.1025	0.7784	0.8965	0.8316	1.044	1.018	1.008	0.8604	8
0.0035	9.330	0.0948	0.7976	0.8700	0.8050	1.039	1.014	1.013	0.8707	0.28

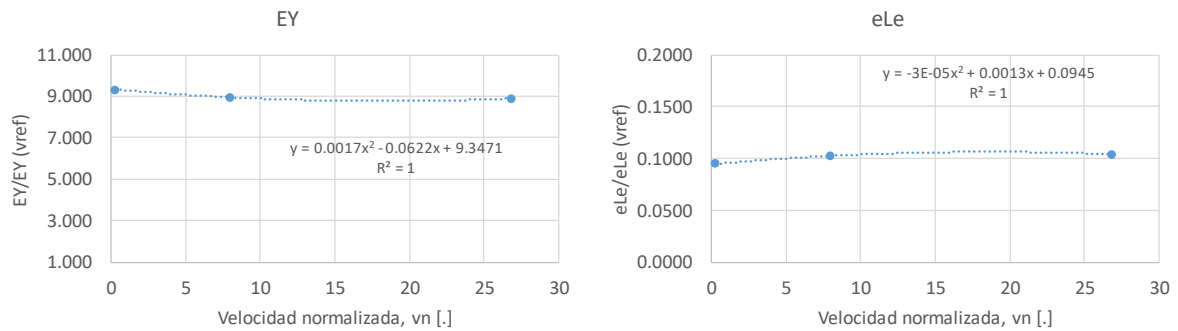
A partir de los datos mostrados en la Tabla 4.3 se han representado las gráficas de las sensibilidades. En estas gráficas se muestran los polinomios de tendencia. Estos polinomios pueden tener hasta grado 3, aunque en la mayoría de los casos son de grado 1, es decir, son rectas. Esto se debe a que, siendo tan pequeño el rango de velocidades estudiado, las variaciones que sufren los distintos parámetros son muy pequeñas.

La variación del Módulo de Young se muestra, junto con la del límite elástico, en la Fig. 4.21. En esta figura no se ha incluido el polinomio de ajuste porque se ve claramente que la evolución de los datos no sigue una tendencia coherente.



**Figura 4.21.** Sensibilidad del Módulo de Young y del límite elástico del Acero C45-N.

De hecho, dado que se obtuvo un cierto error en el ajuste de la curva de tracción de las probetas ensayadas a la velocidad de referencia, y que en la Fig. 4.21 se ve que los puntos correspondientes a este ensayo descuadrán la tendencia, no se va a tener en cuenta este punto para obtener el polinomio de tendencia, como se puede ver en la Fig. 4.22. (Ese ensayo habrá de ser repetido en el futuro.) A partir de ahora, este punto no será incluido en ninguno de los polinomios de ajuste de este material.



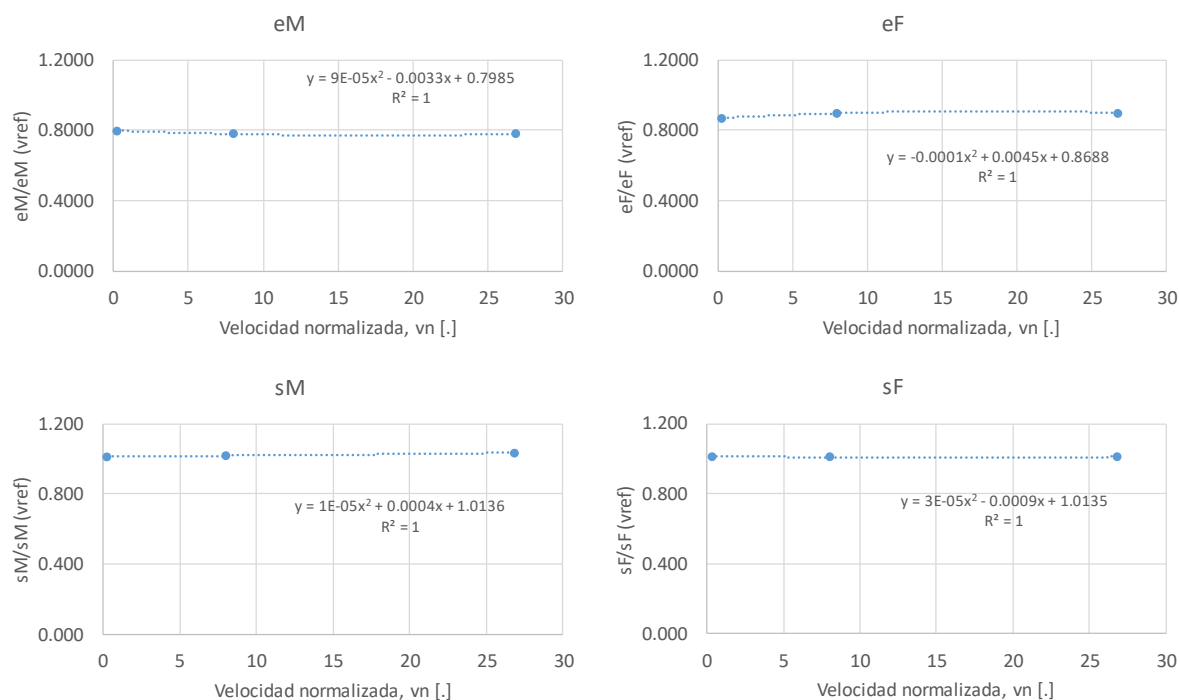
**Figura 4.22.** Sensibilidad y polinomio de tendencia del Módulo de Young y del límite elástico del Acero C45-N.

Se han aproximado los ajustes por polinomios de segundo grado, porque se obtenía un valor de  $R^2$  igual a 1. Sin embargo, la tendencia podría aproximarse por una recta, decreciente en el caso del Módulo de Young ( $EY$ ) y creciente en el del límite elástico ( $eLE$ ).

La tendencia y el polinomio de ajuste de los puntos final y máximo se muestra en la Fig. 4.23. Se ha eliminado el punto correspondiente a la velocidad de referencia para ser coherentes con lo comentado tras observar la Fig. 4.21.

Como se observa en la Fig. 4.23, a pesar de que en los ajustes se observaba que el punto máximo no se encontraba de manera exacta, la tendencia de la deformación y del esfuerzo en este punto son coherentes con la realidad, aunque sería interesante mejorar el código del simulador para optimizar la búsqueda de dicho punto.

Durante la selección de los datos de las tracciones válidos para dibujar la curva  $e-s$ , la cola debe ser eliminada, ya que la máquina podría estar registrando datos de deformación y esfuerzo una vez rota la probeta. Esta eliminación, que se realiza de manera subjetiva y manualmente, conlleva una incertidumbre lo suficientemente alta como para que el estudio del punto de rotura (punto final) pierda interés, ya que no se sabe a ciencia cierta si el último punto seleccionado se corresponde realmente con el punto de rotura. Es por esto por lo que el estudio de su tendencia no es tan crítico.

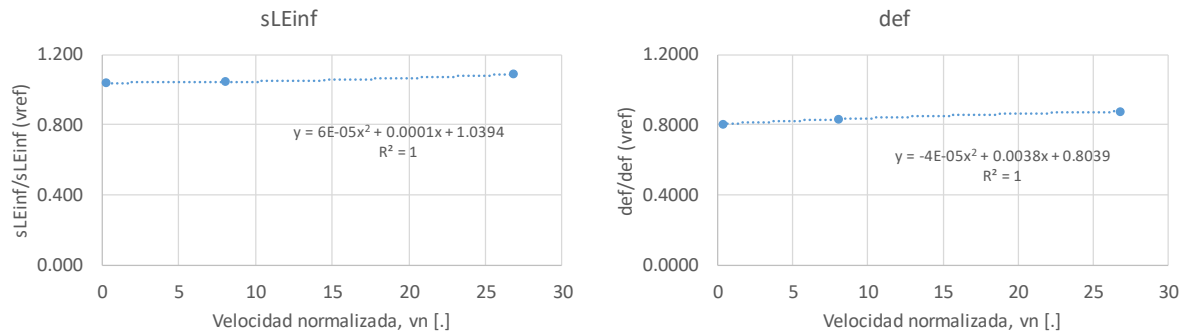


**Figura 4.23.** Sensibilidad y polinomio de tendencia del punto máximo y de rotura del Acero C45-N.

De nuevo, a pesar de que en la Fig. 4.23 se observan tendencias prácticamente lineales —lo que puede deberse al pequeño rango de velocidades— se han aproximado las tendencias por polinomios de segundo grado.

Es necesario comentar que, el hecho de que el ajuste global de una curva sea bueno, no quiere decir que podrá ser representativo del comportamiento de un material. En este caso, el ajuste para las probetas ensayadas a la velocidad de referencia era igual de bueno que para el resto. Sin embargo, el hecho de que la probeta N-02 diera problemas con la primera versión del programa de ajuste y de que ahora se observe que no encaja en la tendencia coherente de los parámetros estudiados, ha hecho que se descarte. Para el resto de las probetas, a pesar de que el máximo no se ajustaba bien, como ya se ha comentado, se considera que la tendencia sí es coherente.

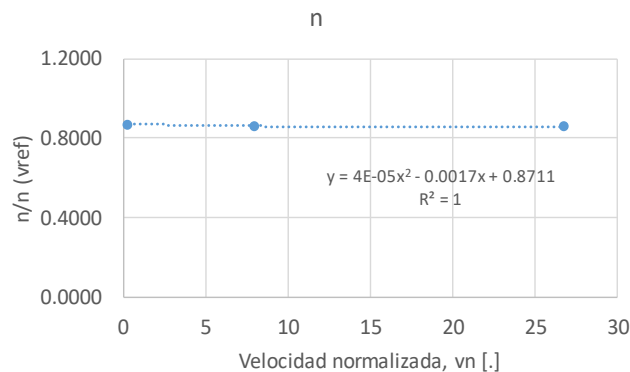
A continuación, se van a mostrar las tendencias del esfuerzo inferior de la zona de fluencia y la longitud de dicha zona. Véase Fig. 4.24 para observar dichas sensibilidades. Se puede decir que ambos parámetros crecen con la velocidad; para este rango, de una forma prácticamente lineal creciente.



**Figura 4.24.** Sensibilidad y polinomio de tendencia de la longitud de la zona de fluencia y la tensión inferior de dicha zona, para el Acero C45-N.

En general, todos los parámetros que se refieren a esfuerzo (tensión) crecen con la velocidad, mientras que la deformación disminuye. La deformación a la rotura, cuya tendencia se observa en la Fig. 4.23, no es coherente con esta tendencia. Esto se debe a que, como se ha explicado previamente, este punto final no tiene por qué corresponderse con el real de rotura.

Por último, en la Fig. 4.25 se muestra la evolución del exponente  $n$  de curvatura con la velocidad, observándose que su tendencia es decreciente. Esto quiere decir que la curva cada vez presenta una amplitud menor, lo cual concuerda con la realidad pues, como ya se ha visto, la deformación es menor al aumentar la velocidad.



**Figura 4.25.** Sensibilidad y polinomio de tendencia de  $n$ , para el Acero C45-N.

## 4.2 Tracciones del Aluminio 2011

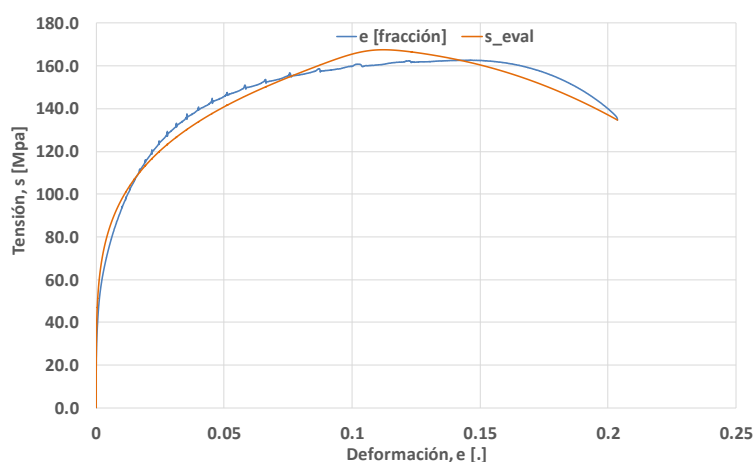
### Ajustes realizados

En este apartado se expondrán los ajustes realizados para las curvas de tracción de las probetas del Aluminio 2011. Para estas probetas se ha obtenido un valor medio de  $R^2$  de 0.9863, siendo mayor de 0.99 para algunas de ellas. En la Tabla 4.4 se muestran los valores de  $R^2$  obtenidos para los ajustes de cada probeta de Aluminio 2011 templado (T6), puesto que es con estas probetas con las que se estudiará la sensibilidad de este material y conviene documentarlas de manera más completa.

**Tabla 4.4.** Valor de  $R^2$  obtenido para el ajuste de cada probeta de Aluminio 2011 T6.

Probeta	T6-01	T6-02	T6-03	T6-04	T6-05	T6-06	T6-07	T6-08
$R^2$	0.9958	0.9960	0.9963	0.9967	0.9962	0.9952	0.9914	0.9899

La nomenclatura empleada para las probetas ya fue explicada en el capítulo 2. Todas ellas han sido ajustadas con la segunda versión del simulador. Solo se presentan las gráficas correspondientes a una de las probetas de cada pareja de probetas iguales.



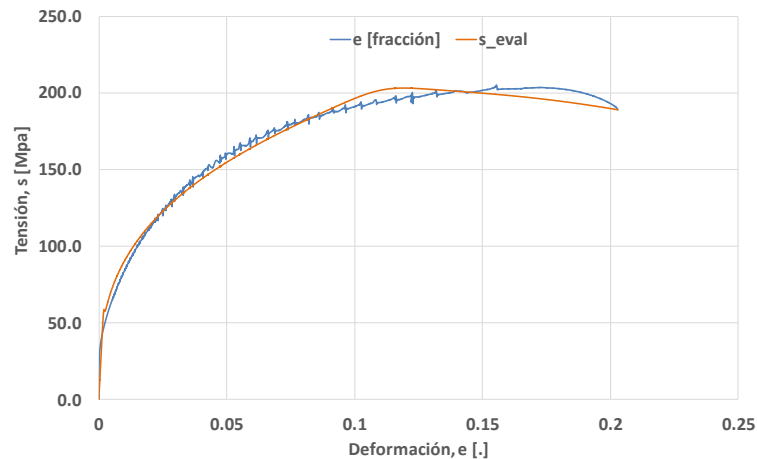
**Figura 4.26.** Tracción Aluminio 2011 O-01.

Como puede observarse en la Fig. 4.26, la curva real (azul) presenta ruido. A pesar de ello, el ajuste no debería empeorar, ya que el método de mínimos cuadrados promedia los valores de la curva real para crear una línea continua que no presente ruido. Sin embargo, en este caso el programa no ha sido capaz de ajustar adecuadamente el punto máximo, lo que parece ser una insuficiencia del simulador.



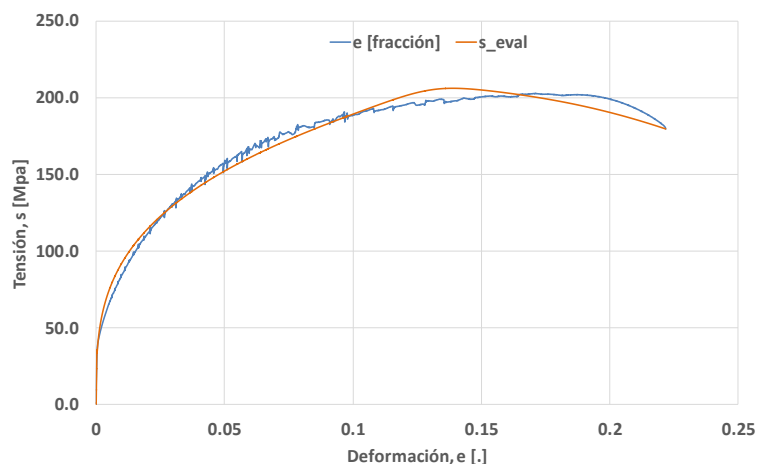
Una manera de solventar este tipo de fallos sería añadir restricciones con la herramienta Solver de Excel. En este caso, se fijarían tanto el valor del esfuerzo máximo como la deformación a la cual se produce ( $s_M$ ,  $e_M$ ).

Con la probeta O1-01, que se ha representado en la Fig. 4.27, sucede algo muy similar a lo que se observó en la Fig. 4.26 con la probeta O-01, a pesar de que dichas probetas no se sometieron al mismo tratamiento térmico.



**Figura 4.27.** Tracción Aluminio 2011 O-03.

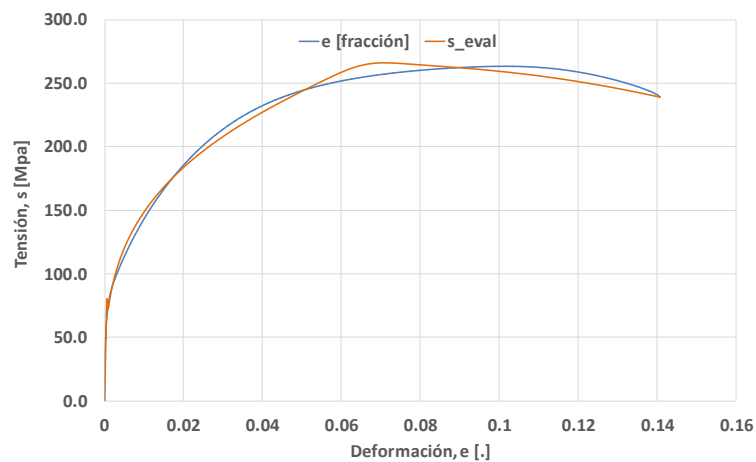
También se observa el ruido y el error en el ajuste del punto máximo en la Fig. 4.28, que sí se sometió al mismo tratamiento térmico que la probeta O-01.



**Figura 4.28.** Tracción Aluminio 2011 O1-01.

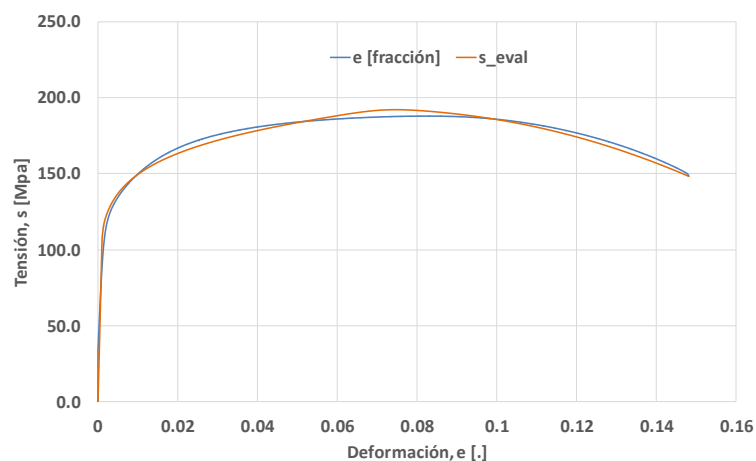
En la Figura 4.29 se observa de nuevo el problema del punto máximo. Como ya se ha comentado, este problema es fácilmente solucionable agregando restricciones apropiadas al Solver. Sin embargo, dado que es un fallo que se repite en un número considerable de

simulaciones, sería conveniente modificar el código del simulador, de forma que el usuario no tuviera que realizar ninguna acción complementaria al mismo.



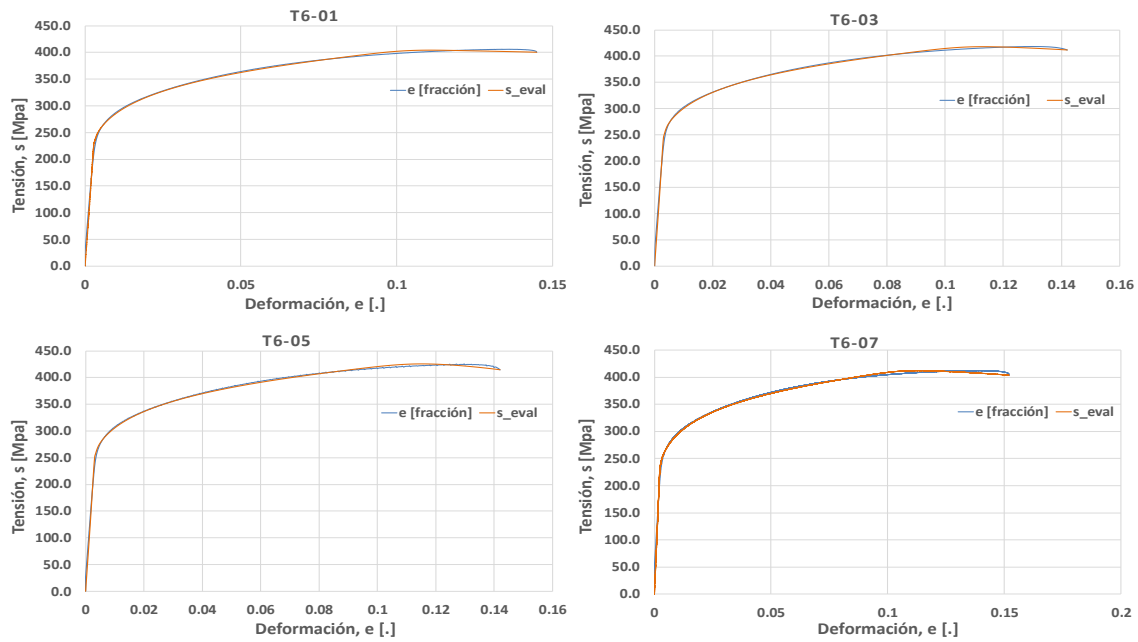
**Figura 4.29.** Tracción Aluminio 2011 T7-01.

En la Fig. 4.30 se observa un pequeño error en el ajuste del máximo, pero más suave que en las figuras presentadas anteriormente. Sin embargo, en todas las probetas T6, de las cuales se muestran algunas en la Fig. 4.31, la curva de tensión evaluada es prácticamente idéntica a la de tensión real. Para estas probetas se ha conseguido un ajuste con un  $R^2$  mayor de 0.99.



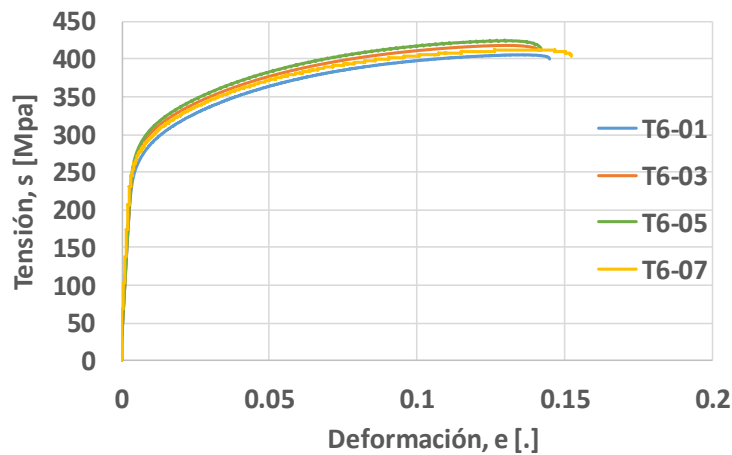
**Figura 4.30.** Tracción Aluminio 2011 H2-01.

Las curvas de las probetas T6 se han representado todas juntas por su similitud. Además, dado que estas probetas son del mismo material, con el mismo tratamiento térmico, pero fueron ensayadas a distintas temperaturas, se podrá estudiar la sensibilidad del Aluminio. En este caso, dicha sensibilidad ha sido estudiada únicamente con respecto a la temperatura porque no se realizaron ensayos a distintas velocidades.



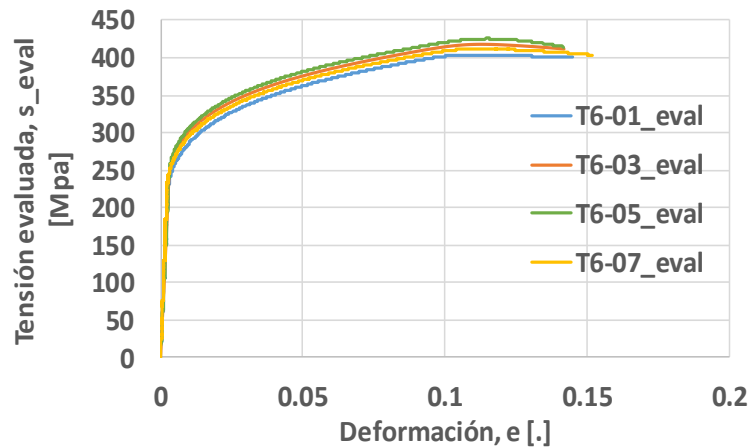
**Figura 4.31.** Tracción Aluminio 2011 T6.

Además, del mismo modo que se realizó con las probetas de Acero C45 normalizado, se han representado conjuntamente las probetas T6 de Aluminio, a modo de comprobación de que las curvas simuladas reproducen bien las reales en su conjunto. El conjunto de curvas reales se muestra en la Fig. 4.32 y el conjunto de simuladas en la Fig. 4.33.

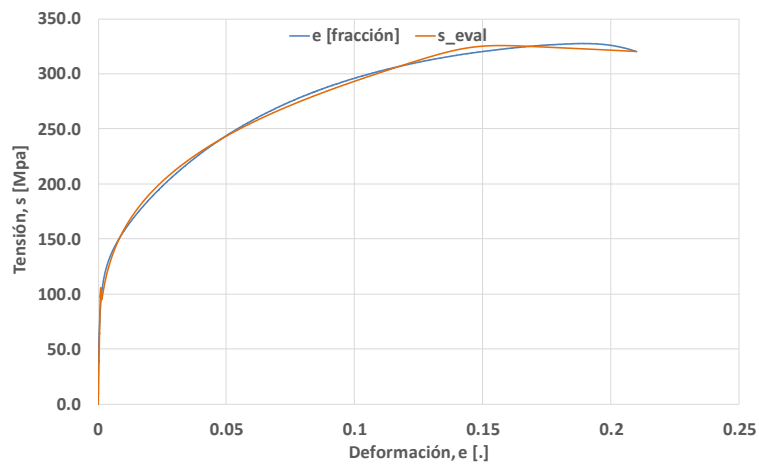


**Figura 4.32.** Conjunto de tracciones reales de las probetas de Aluminio 2011 T6.

Comparando las figuras 4.32 y 4.33 se puede decir que las curvas simuladas sí representan, a gran escala, la tendencia de las curvas reales.



**Figura 4.33.** Conjunto de tracciones simuladas de las probetas de Aluminio 2011 T6.



**Figura 4.34.** Tracción Aluminio 2011 SH-03.

De nuevo, en la Fig. 4.34 se observa un pequeño error en el ajuste del punto máximo, que a su vez conlleva un error en la curvatura de la región de deformación plástica.

A la hora de evaluar la magnitud de los errores comentados, hay que tener en cuenta que, dentro de la escala en la que se está trabajando, el orden de magnitud de estos errores es considerablemente pequeño. Por lo tanto, a la hora de estudiar las propiedades mecánicas de un material, no deberían afectar mucho en la elección del más adecuado.

No debe olvidarse que el objetivo de este proyecto es tratar de reducir el número de materiales que cumplen con unos requisitos especificados mediante la simulación de las curvas de tracción.

### Sensibilidad del Aluminio 2011 con respecto a la temperatura de ensayo

En el caso del Aluminio 2011, no se disponía de datos de ensayos realizados a temperatura ambiente a distintas velocidades. Sin embargo, sí se habían realizado ensayos a la velocidad de referencia, pero a altas temperaturas. Por lo tanto, en este caso se estudia la sensibilidad con respecto a la temperatura de ensayo.

La base de datos del Aluminio se ha realizado del mismo modo que para el resto de los materiales, pero recogiendo los valores en función de la temperatura del ensayo al que corresponden. Para estudiar las sensibilidades, se ha normalizado la temperatura de ensayo dividiendo por la temperatura ambiente (25 °C) y se ha obtenido el valor medio de todos los parámetros para cada pareja de probetas iguales. Estos datos se muestran en la Tabla 4.5. Dado que las curvas de tracción de este material no presentan zona de fluencia, no se estudiarán las sensibilidades de los siguientes parámetros: límite elástico (porque su valor no es preciso), longitud de la zona de fluencia (porque es nula) y tensión inferior de la región de fluencia (porque no existe en este caso al ser nula la longitud de dicha región).

**Tabla 4.5.** Datos recogidos de los ensayos de tracción realizados con las probetas de Aluminio 2011 T6 a distintas velocidades.

T (K)	EY [MPa]	eM [.]	eF [.]	sM [MPa]	sF [MPa]	n[.]
298	76868.51	0.1078	0.1492	411.50	402.91	0.1424
373	77764.82	0.1054	0.1415	412.83	408.93	0.1418
473	77968.02	0.1118	0.1483	425.00	414.58	0.1375
573	94324.69	0.1152	0.1589	415.96	398.53	0.1382

En la Tabla 4.5 puede apreciarse que las tendencias no se ajustan completamente a lo esperado en la realidad: las deformaciones deben aumentar con la temperatura y los valores de esfuerzo máximo también. A pesar de que con los ajustes de las curvas del Aluminio 2011 T6 se obtenían valores de  $R^2$  mayores a 0.99, como se vio en la Tabla 4.4, la tendencia obtenida no es correcta. Solo la tendencia de la deformación que se obtiene para el esfuerzo máximo es coherente. Por lo tanto, se han repetido los ajustes de las probetas de Aluminio 2011 T6 forzando el valor del punto máximo agregando restricciones al Solver de Excel. A partir de estos nuevos ajustes se ha elaborado una nueva base de datos para este material y se han estudiado las sensibilidades.

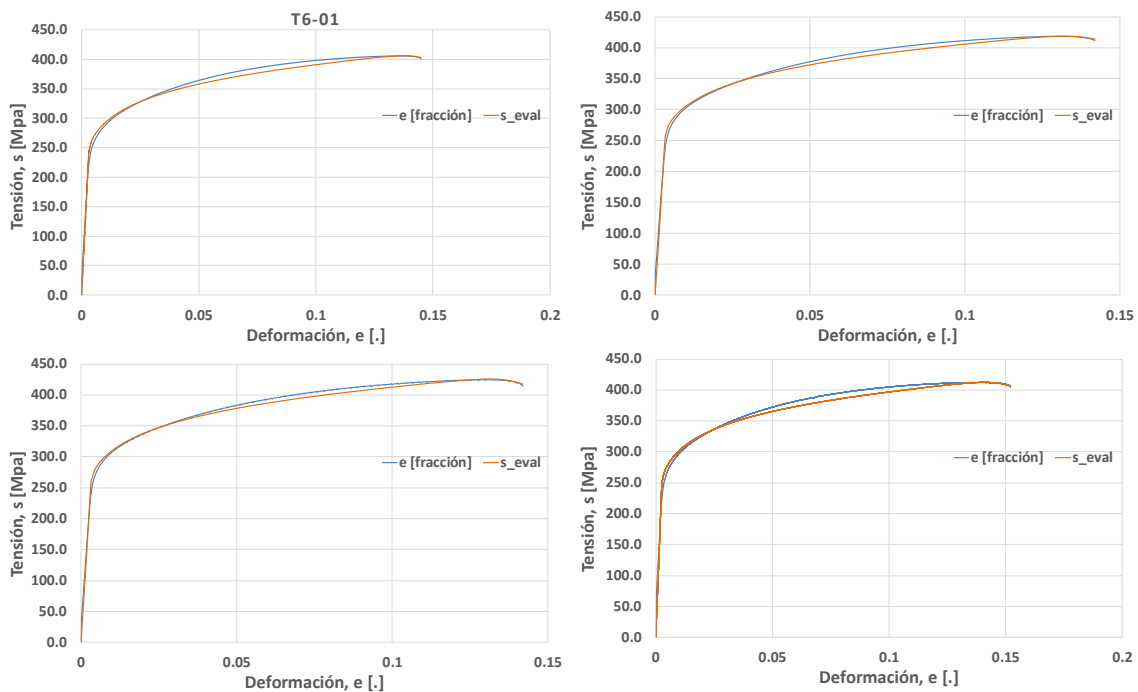
Para estos ajustes se han obtenido valores de  $R^2$  menores, lo cual vuelve a demostrar que un ajuste global mejor no conlleva una mejor descripción del comportamiento de un material. Estos valores se muestran en la Tabla 4.6.

**Tabla 4.6.** Valor de  $R^2$  obtenido para el ajuste de cada probeta de Aluminio 2011 T6, forzando el máximo.

Probeta	T6-01	T6-02	T6-03	T6-04	T6-05	T6-06	T6-07	T6-08
$R^2$	0.9894	0.9911	0.9926	0.9930	0.9933	0.9904	0.9828	0.9830

Gráficamente solo se muestra una de las curvas por cada pareja de probetas iguales, aunque para elaborar la base de datos se han tenido en cuenta los datos de las dos componentes de cada par para obtener el valor promedio de cada parámetro.

Las curvas de tracción de los nuevos ajustes realizados se muestran en la Fig. 4.35, donde se puede comprobar lo que ya se ha observado en la Tabla 4.6, que los ajustes difieren un poco más de las curvas reales que en los ajustes realizados sin forzar el punto máximo de la Fig. 4.31.



**Figura 4.35.** Ajuste de las probetas de Aluminio 2011 T6 forzando el punto máximo.

Los nuevos valores promedio para cada uno de los parámetros de los que se va a estudiar sensibilidad se muestran en la Tabla 4.7.

**Tabla 4.7.** Datos recogidos de los ensayos de tracción realizados con las probetas de Aluminio 2011 T6 a distintas velocidades, forzando el punto máximo.

T	EY [MPa]	eM [.]	eF [.]	sM [MPa]	sF [MPa]	n[.]
298	75314.92	0.1358	0.1491	412.29	402.91	0.1225
373	76456.47	0.1299	0.1415	414.59	408.93	0.1253
473	76780.71	0.1352	0.1483	425.78	414.58	0.1219
573	91510.10	0.1399	0.1589	414.09	398.53	0.1181

A partir de los datos de la Tabla 4.7 se puede concluir que las probetas ensayadas a 573 K no encajan en la tendencia del resto, pues la tensión máxima debería ser mayor que para las probetas ensayadas tanto a 373 K como a 573 K, y, sin embargo, es menor que ambas.

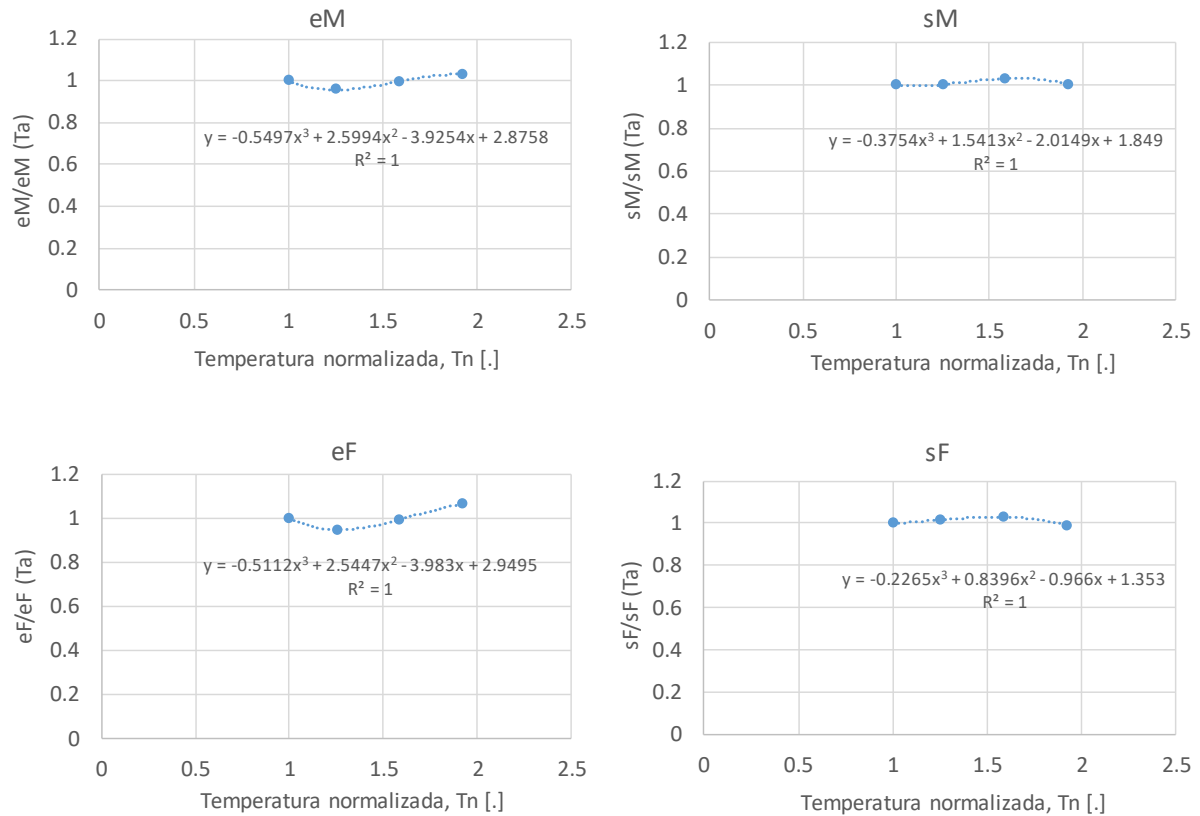
Para representar dichas tendencias y obtener el polinomio que mejor las ajusta, se han normalizado todos los parámetros dividiendo por el valor obtenido para el ensayo realizado a temperatura ambiente. Dichos valores normalizados se muestran en la Tabla 4.8, donde  $T_n$  representa la temperatura normalizada. A partir de estos datos se han obtenido las figuras siguientes.

**Tabla 4.8.** Datos normalizados recogidos de los ensayos de tracción realizados con las probetas de Aluminio 2011 T6 a distintas velocidades, forzando el punto máximo.

T	EY [MPa]	eM [.]	eF [.]	sM [MPa]	sF [MPa]	n[.]	Tn
298	1	1	1	1	1	1	1
373	1.015	0.9568	0.9484	1.006	1.0150	1.0231	1.25
473	1.019	0.9956	0.9943	1.033	1.0290	0.9951	1.59
573	1.215	1.0302	1.0651	1.004	0.9891	0.9645	1.92

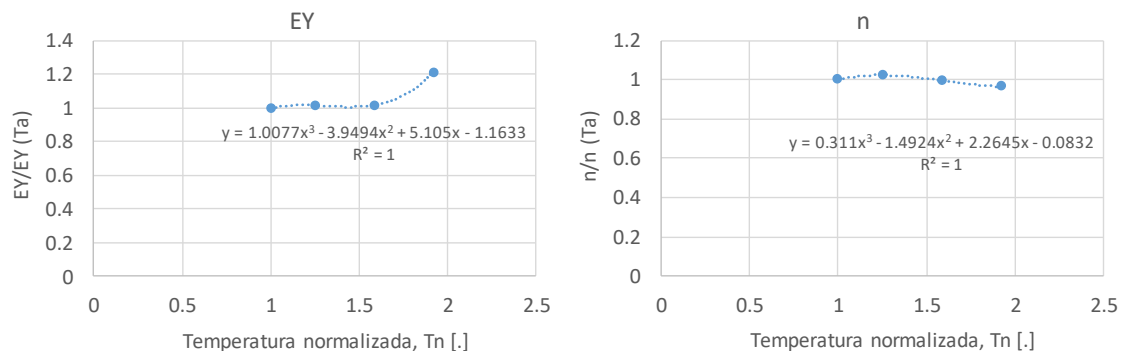
No se tiene tanto en cuenta la tendencia del punto final por la incertidumbre que conlleva, ya que se ha eliminado la cola del material de una forma subjetiva y podría no corresponderse con el punto de rotura real. A pesar de ello, se va a representar la tendencia de este punto junto con la del punto máximo, en la Fig. 4.36.

Los polinomios de tendencia que mejor se ajustan a las sensibilidades de estos parámetros son de tercer grado. Sin embargo, lo que se observa en la Fig. 4.36 es que la tendencia tiende a ser prácticamente lineal. En este caso el intervalo de temperaturas en torno al que se está estudiando la sensibilidad es aún menor: mientras que los valores de la velocidad normalizada estaban entre 0 y 26.8, la temperatura normalizada varía entre 1 y 1.92. Es por ello por lo que las variaciones son aún menos apreciables. Sin embargo, lo lógico sería que en caso de que se apreciaran, las deformaciones aumentarían con la temperatura, lo cual no se corresponde correctamente con lo obtenido en la Fig. 4.36.



**Figura 4.36.** Sensibilidades del punto de máxima tensión y del punto de rotura del Aluminio 2011 T6.

En la Fig. 4.37 se muestran las sensibilidades del Módulo de Young y del exponente  $n$ . A priori, la tendencia que se prevé para el Módulo de Young es creciente, lo cual ha sido corroborado con los datos de las Tablas 4.7 y 4.8. Esto se debe a que con el aumento de la temperatura los materiales se vuelven más elásticos, por eso también aumentan las deformaciones.



**Figura 4.37.** Sensibilidades del punto del Módulo de Young y del exponente  $n$  del Aluminio 2011 T6.



### 4.3 Tracciones del Acero 304

#### Ajustes realizados

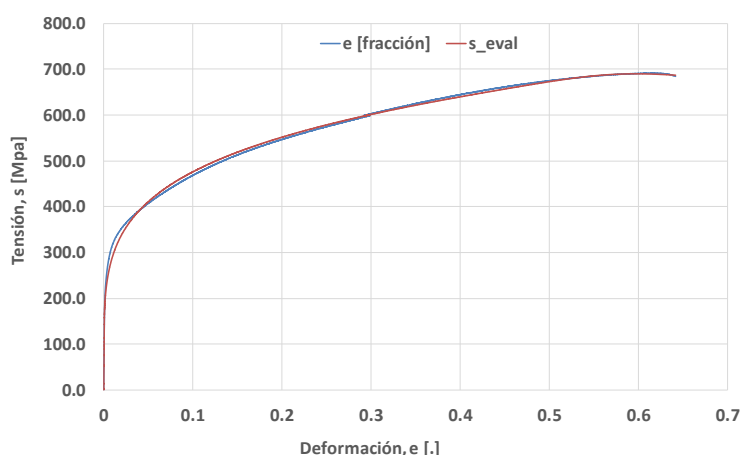
En este apartado se presentan las tracciones del Acero 304. Como ya se mencionó en el epígrafe 2.3, de este material no se estudiarán sensibilidades. Esto se debe a que no se dispone actualmente de datos de ensayos de este material a temperaturas distintas de la ambiente o velocidades distintas de 0.0125 mm/s.

Para los ajustes de las curvas de tracción de este material se ha obtenido un  $R^2$  promedio de 0.992. En la Tabla 4.9 se pueden observar los valores de  $R^2$  obtenidos para cada probeta de este material.

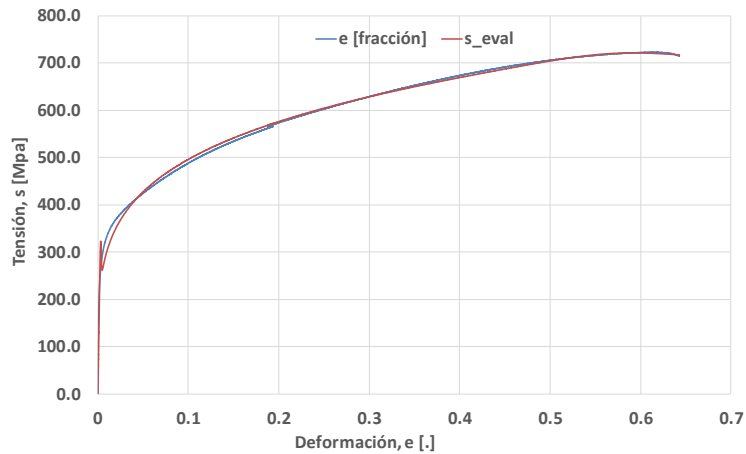
**Tabla 4.9.** Valor de  $R^2$  obtenido para el ajuste de cada probeta de Acero 304.

Probeta	A-01	A-02	A-03	A-11	A-12
$R^2$	0.9968	0.9932	0.9781	0.9954	0.9961

Puede observarse que el peor ajuste se obtuvo para la probeta de la Fig. 4.40, que se corresponde con la A-03.

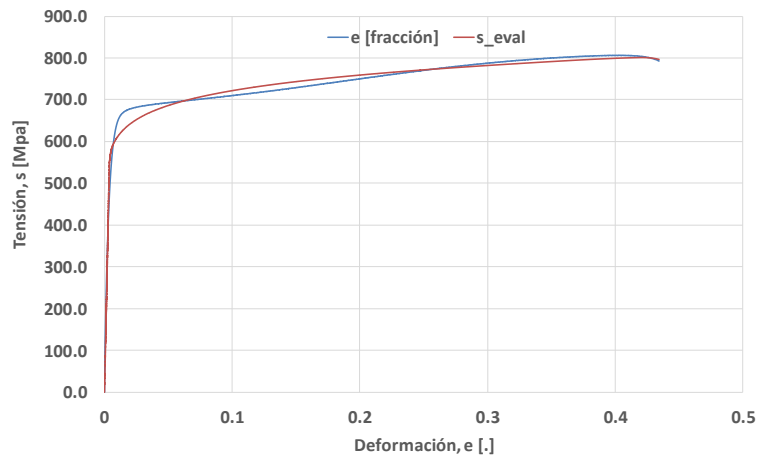


**Figura 4.38.** Tracción del Acero 304 A-01.



**Figura 4.39.** Tracción del Acero 304 A-02.

Las probetas de las figuras 4.38 y 4.39 son iguales (probetas estabilizadas en agua en una hora) y, sin embargo, al ajuste obtenido no lo es. Mientras que en la Fig. 4.38 se observa un ajuste prácticamente perfecto, en la Fig. 4.39 se puede ver que el programa ha tratado de simular una zona de fluencia que en realidad no existe. Una manera de solucionar este fallo podría ser modificar el código de forma que en caso de no existir región de fluencia ( $def = 0$ ), no tuviera en cuenta el ajuste de dicha zona de la curva.

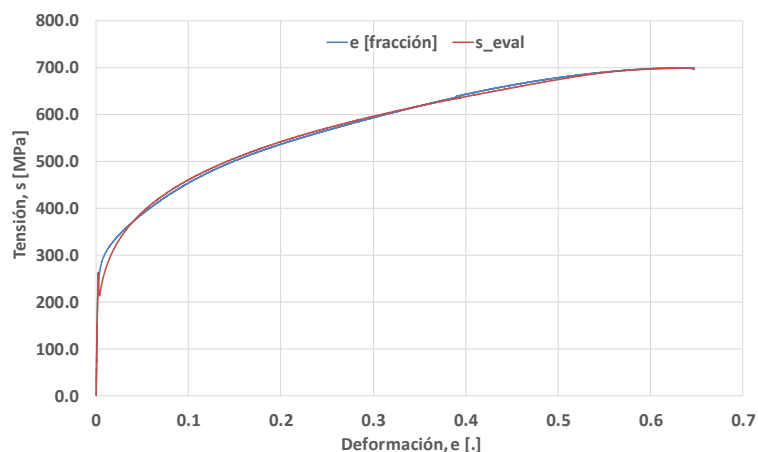


**Figura 4.40.** Tracción del Acero 304 A-03.

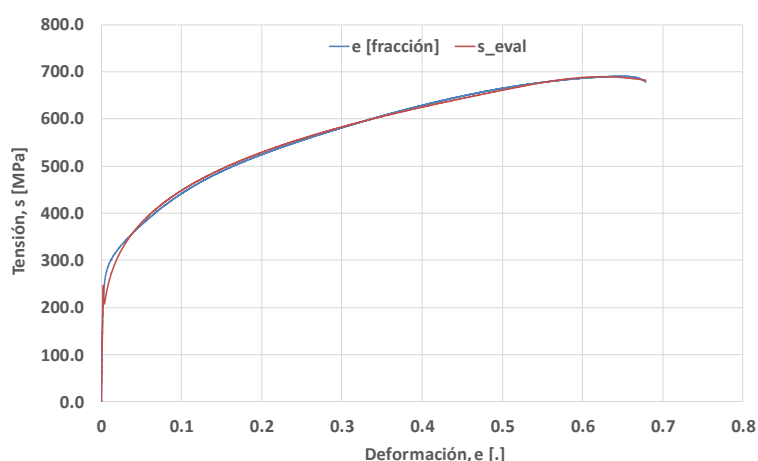
La curva de la Fig. 4.40 se corresponde con el ensayo de la probeta de origen de este material. Se puede observar que tiene una zona elástica mayor que las probetas estabilizadas y una región plástica más horizontal. El cambio de pendiente tan brusco que se produce entre la zona elástica y la plástica no se ha ajustado bien debido a que el código suaviza los cambios de

pendiente. Esto lo hace para conseguir que las distintas funciones que ajustan la curva por trozos encajen, formando una curva continua.

Una forma de mejorar este ajuste sería disminuir ese suavizado que realiza el programa.



**Figura 4.41.** Tracción del Acero 304 A-11.



**Figura 4.42.** Tracción del Acero 304 A-12.

Las curvas de las figuras 4.41 y 4.42 se corresponden con los ensayos de las probetas estabilizadas en salmuera en una hora. Como puede observarse, su forma se parece mucho a las estabilizadas en agua. La longitud de la zona elástica no cambia, y tampoco el máximo y el punto de rotura sufren cambios notables. El ajuste es casi perfecto en estos casos, ya que la transición de la zona elástica a la plástica es menos brusca que en la Fig. 4.40.

## 4.4 Tracciones del Latón

### Ajustes realizados

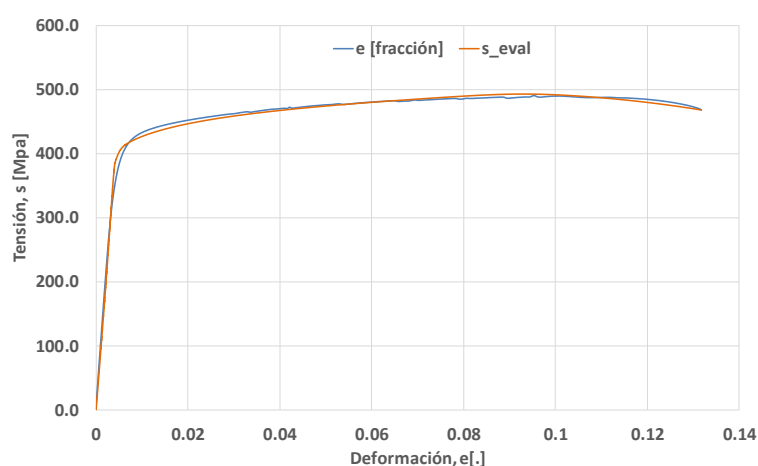
En este apartado van a presentarse algunos de los ajustes realizados con las curvas de tracción de las probetas de Latón. De nuevo, se muestra una curva de ajuste de cada par de probetas iguales. Todas las probetas que se muestran de este material se han ensayado a temperatura, pero a distintas velocidades. Para ver la velocidad de trabajo con la que se ha ensayado cada probeta véase el capítulo 2.

A pesar de que el cambio de pendiente entre la zona elástica y la plástica es bastante brusco, el ajuste obtenido es bastante bueno, con un valor promedio de  $R^2$  de 0.984. Los valores obtenidos de  $R^2$  para cada probeta se muestran en la Tabla 4.10.

**Tabla 4.10.** Valor de  $R^2$  obtenido para el ajuste de cada probeta de Latón.

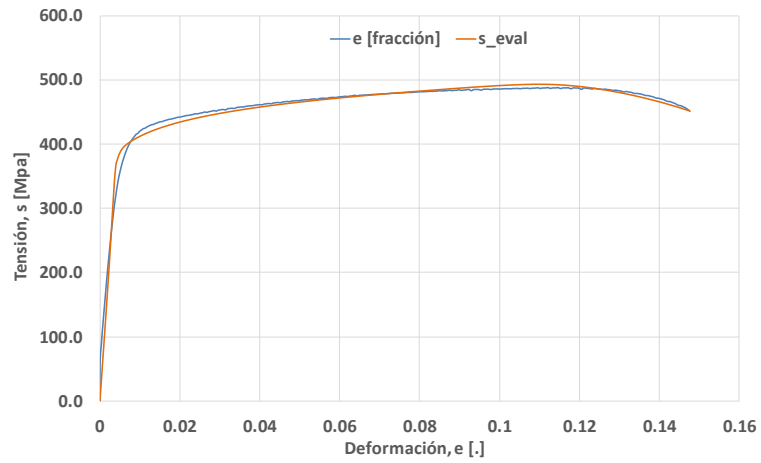
Probeta	L-01	L-02	L-03	L-04	L-05	L-06	L-07	L-08
$R^2$	0.9932	0.9931	0.9761	0.9942	0.9759	0.9713	0.9925	0.9920

En la Fig. 4.43 se muestra el ajuste obtenido para la probeta L-01, ensayada a la velocidad de referencia.



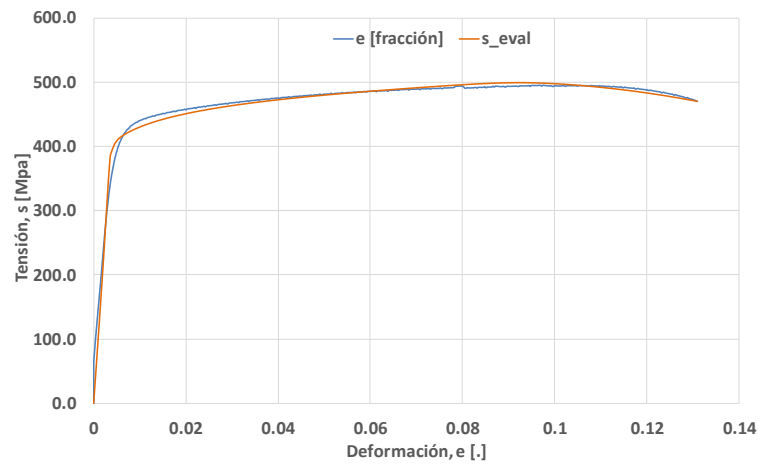
**Figura 4.43.** Tracción del Latón L-01.

En la Fig. 4.44 se puede observar el ajuste obtenido para la probeta L-03. Esta probeta se ha ensayado a una velocidad casi treinta veces mayor que la L-01. Comparando sus respectivas figuras se observa que, a mayor velocidad de ensayo, mayor deformación de la pieza se obtiene. Esto se estudiará en el análisis de sensibilidad del Latón con respecto a la velocidad de trabajo, en el subapartado siguiente al presente.

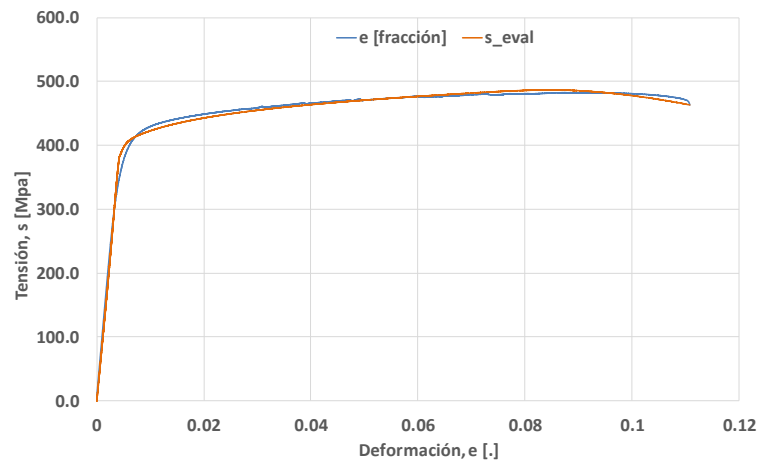


**Figura 4.44.** Tracción del Latón L-03.

El mismo tipo de observaciones pueden realizarse comparando la Fig. 4.43 con la Fig. 4.45 o la 4.46.



**Figura 4.45.** Tracción del Latón L-05.

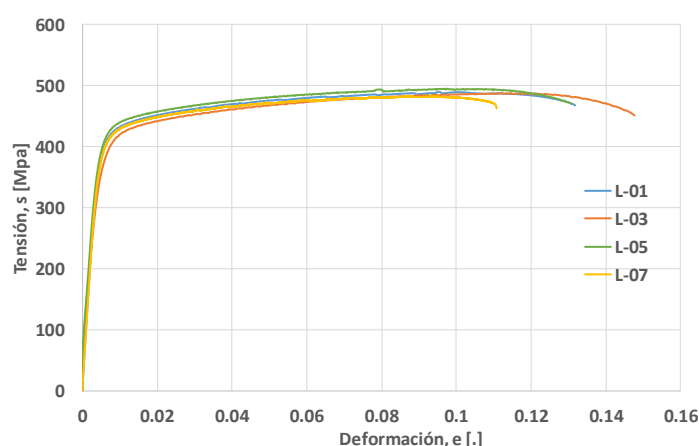


**Figura 4.46.** Tracción del Latón L-07.

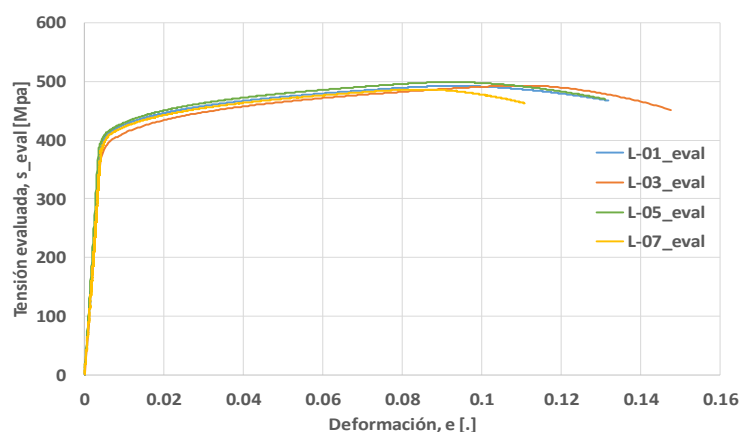
Tal y como se dijo al principio y se ha comprobado observando estas figuras, el ajuste logrado para este material es muy bueno. Podría mejorarse el ajuste de la región de transición de la zona de deformación elástica a la plástica. Como se ha explicado para los materiales estudiados previamente, esto podría mejorarse disminuyendo la suavización de las pendientes de las funciones de ajuste empleadas en estas dos zonas. Habría que tener cuidado al realizar eso porque podría aparecer un pico en la unión de las funciones, lo cual no es deseable.

Cabe comentar que, a pesar de que el ajuste obtenido es muy bueno visualmente, el punto de esfuerzo máximo no se ha modelado del todo correctamente. Esto podría ocasionar problemas a la hora de estudiar la tendencia de dicho punto al aumentar la velocidad de ensayo, como se explicará a continuación.

Se ha comprobado el ajuste global de las curvas de las probetas con las que, a continuación, va a estudiarse la sensibilidad, representando conjuntamente las probetas de Latón L-01, L-03, L-05 y L-07. El conjunto de curvas reales se muestra en la Fig. 4.47, mientras que el conjunto de curvas simuladas se muestra en la Fig. 4.48.



**Figura 4.47.** Conjunto de tracciones reales de las probetas de Latón.



**Figura 4.48.** Conjunto de tracciones simuladas de las probetas de Latón.

### Sensibilidad del Latón con respecto a la velocidad de ensayo

Para estudiar la sensibilidad del Latón con respecto a la velocidad de ensayo, de cada par de probetas iguales se hizo una media de los valores de estudio, igual que para el resto de los materiales. Estos valores se tomaron de la base de datos de este material. Los datos medios para cada velocidad de ensayo se han recogido en la Tabla 4.11.

**Tabla 4.11.** Datos recogidos de los ensayos de tracción realizados con las probetas de Latón a distintas velocidades.

vel [mm/sec]	EY [MPa]	eM [.]	eF [.]	sM [MPa]	sF [MPa]	n[.]
0.0125	88078.62	0.0834	0.1263	493.79	472.51	0.0668
0.335	87558.83	0.1021	0.1417	495.93	454.73	0.0702
0.1	97738.87	0.0957	0.1386	496.20	460.87	0.0683
0.0035	85958.35	0.0810	0.1112	486.04	462.03	0.0682

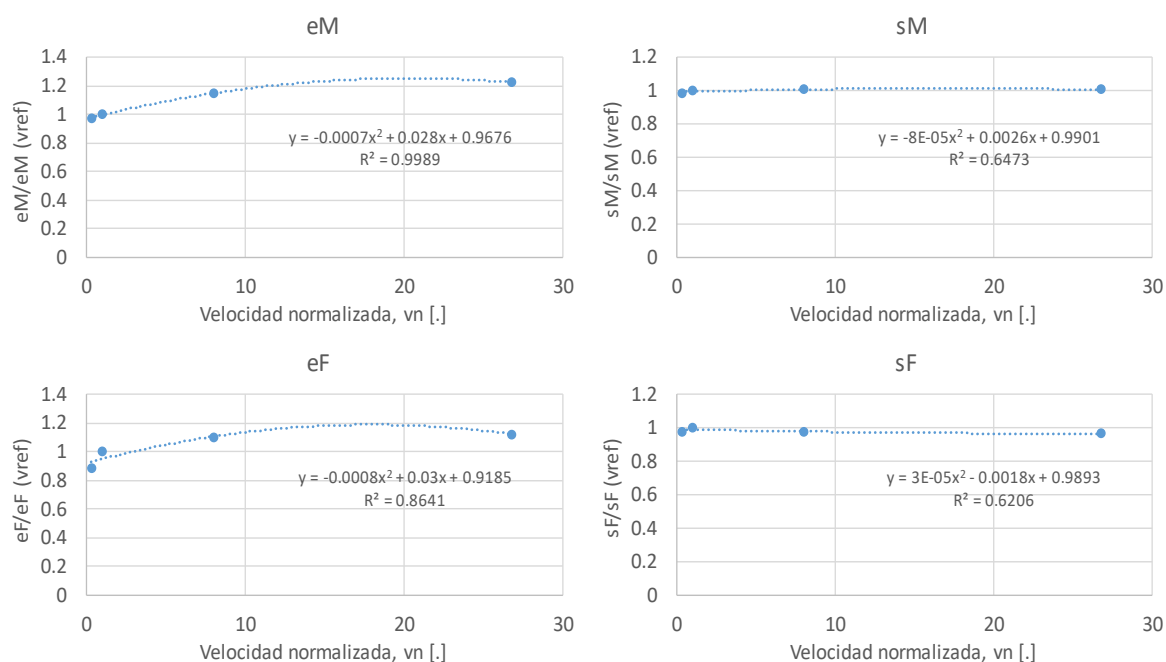
En este caso, dado que ninguna de las curvas de tracción presentaba región de fluencia, no se va a estudiar la variación de la longitud de esta zona (*def*) con respecto a la velocidad. Por lo tanto, tampoco se va a estudiar la de la tensión del límite inferior de la zona de fluencia ( $s_{LE,inf}$ ) ni la variación del límite elástico (*eLE*).

Para estudiar la sensibilidad al mismo tiempo que se obtienen los polinomios de tendencia de los distintos parámetros, se han normalizado todos los valores de la Tabla 4.11, dividiendo cada uno de ellos por el obtenido a la velocidad de referencia (0.0125 mm/s). Estos valores se muestran en la Tabla 4.12.

**Tabla 4.12.** Datos normalizados recogidos de los ensayos de tracción realizados con las probetas de Latón a distintas velocidades.

vel [mm/s]	EY [MPa]	eM [.]	eF [.]	sM [MPa]	sF [MPa]	n[.]	vn
0.0125	1	1	1	1	1	1	1
0.335	0.9941	1.2228	1.1220	1.0043	0.9624	1.0507	26.8
0.1	1.1097	1.1466	1.0981	1.0049	0.9754	1.0230	8
0.0035	0.9759	0.9709	0.8806	0.9843	0.9778	1.0210	0.28

Dada la incertidumbre del punto de rotura, el estudio de su sensibilidad no es tan crítico como el de la sensibilidad del punto de máximo esfuerzo. A pesar de ello, se han representado las tendencias de ambos puntos junto con los polinomios que las describen en la Fig. 4.49.



**Figura 4.49.** Sensibilidades del punto de esfuerzo máximo y del punto de rotura del Latón.

La primera observación que cabe realizar es que, al contrario de lo que se plantea teóricamente como razonable, la deformación alcanzada para el punto de esfuerzo máximo aumenta con la velocidad de ensayo. Dado que esto no es coherente y que el punto máximo no quedó bien ajustado, antes de seguir estudiando la sensibilidad de este material, se van a repetir los ajustes, solo que esta vez forzando el valor del punto máximo.

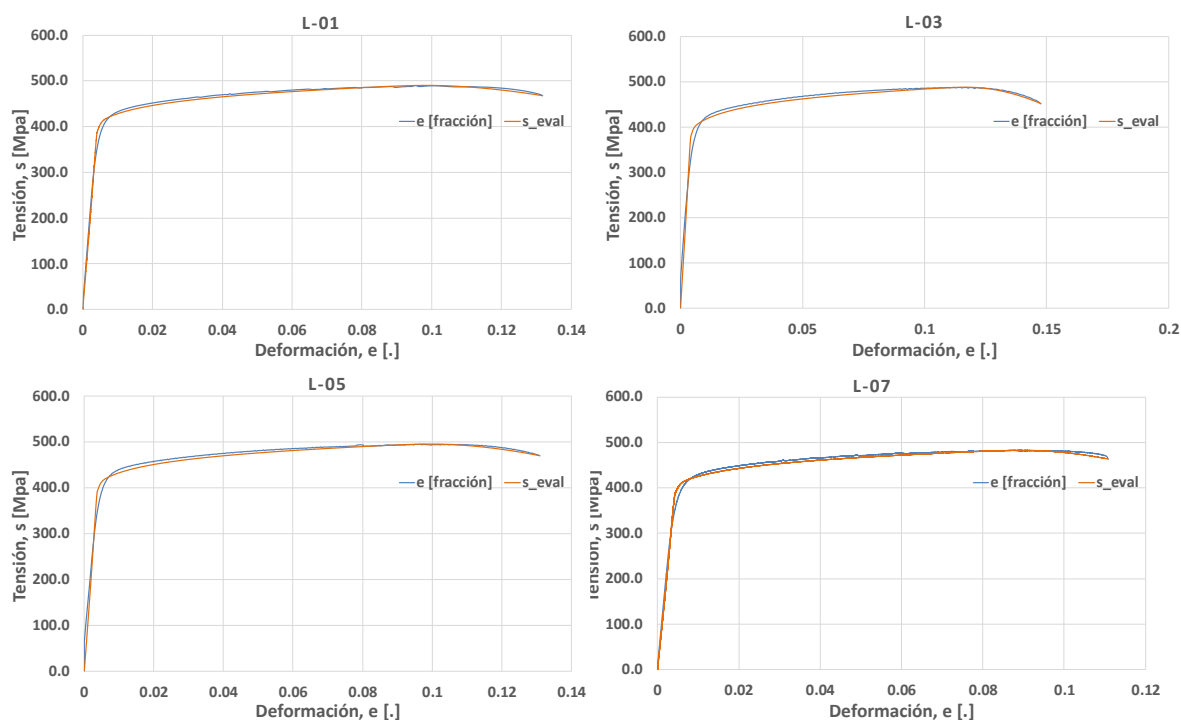
Los valores de  $R^2$  obtenidos para estos nuevos ajustes se muestran en la Tabla 4.13. Las curvas de tracción de los nuevos ajustes se han representado en la Fig. 4.50.

**Tabla 4.13.** Valor de  $R^2$  obtenido para el ajuste de cada probeta de Latón forzando el punto máximo.

Probeta	L-01	L-02	L-03	L-04	L-05	L-06	L-07	L-08
$R^2$	0.9927	0.9922	0.9739	0.9933	0.9744	0.9683	0.9915	0.9904

Comparando los valores de la Tabla 4.13 con los de la Tabla 4.10 se comprueba que los ajustes realizados forzando el valor del punto máximo son de peor calidad. Sin embargo, tal y como se observa en la Fig. 4.50, siguen modelando muy bien la curva de tracción.





**Figura 4.50.** Tracciones del Latón forzando el valor del punto máximo.

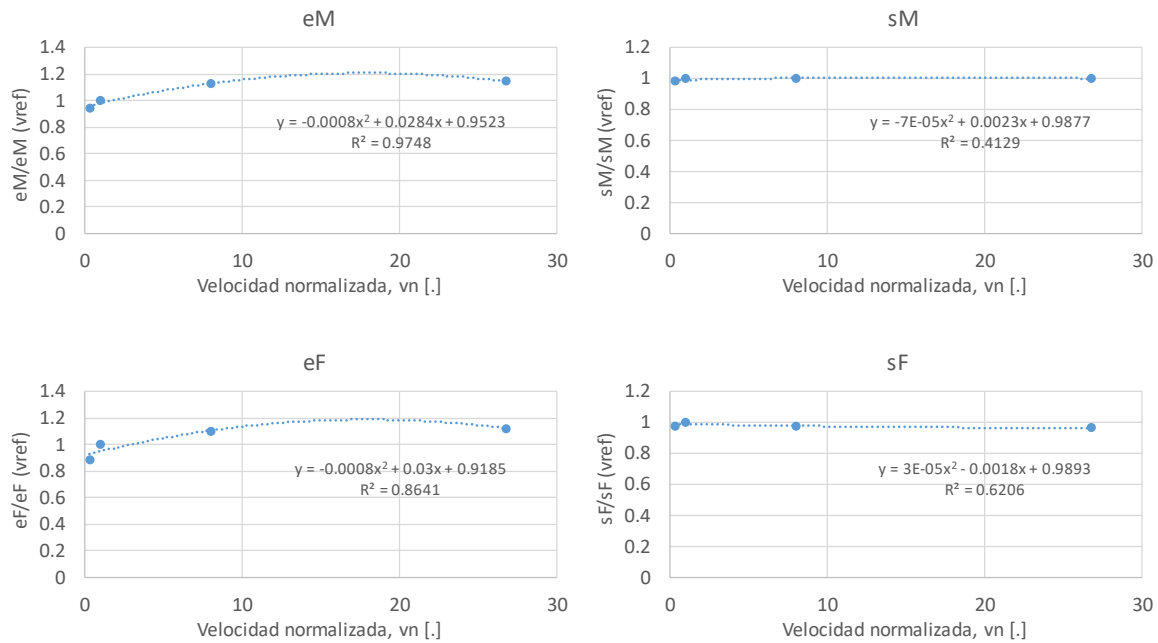
Los valores normalizados de los parámetros en torno a los que se estudia la sensibilidad se muestran en la Tabla 4.14, donde puede comprobarse que la tendencia sigue sin ser coherente con lo esperado: a mayor velocidad de ensayo, la deformación alcanzada para el esfuerzo máximo sigue creciendo. A pesar de ello, dado que las diferencias son muy pequeñas, se puede pensar que realmente no esté variando la deformación, dado que el rango de velocidades estudiado es muy pequeño y podría ser que la incertidumbre no permitiese apreciar cambio alguno en las magnitudes medidas. Para ver más claramente las tendencias, se han representado los parámetros de la Tabla 4.14 con respecto a la velocidad normalizada, obteniendo el polinomio de tendencia.

**Tabla 4.14.** Datos normalizados recogidos de los ensayos de tracción realizados con las probetas de Latón a distintas velocidades forzando el punto máximo.

vel [mm/sec]	EY [MPa]	eM [.]	eF [.]	sM [MPa]	sF [MPa]	n[.]	vn
0.0125	1	1	1	1	1	1	1
0.335	0.9879	1.1442	1.1220	0.9987	0.9624	1.0395	26.8
0.1	1.1031	1.1262	1.0981	1.0004	0.9754	0.9928	8
0.0035	0.9746	0.9425	0.8806	0.9795	0.9778	0.9870	0.28

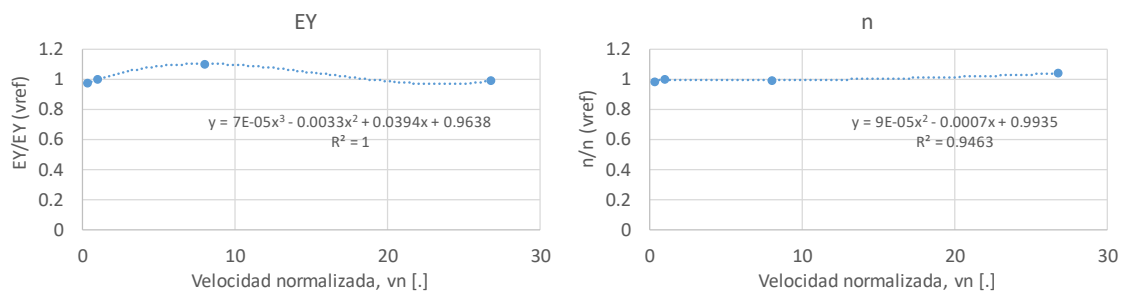
En la Fig. 4.51 se han representado las sensibilidades del punto final y del máximo. En los cuatro casos representados, el polinomio que mejor ajusta la tendencia ha resultado ser de

segundo grado, a pesar de que, como se ha comentado ya previamente, las tendencias podrían ser prácticamente líneas rectas.



**Figura 4.51.** Sensibilidades del punto de esfuerzo máximo y del punto de rotura del Latón, para los ajustes realizados forzando el máximo.

Por otro lado, en la Fig. 4.52 se muestran los polinomios de tendencia de las sensibilidades del Módulo de Young y del exponente  $n$ . De nuevo, se han empleado polinomios de segundo grado, a pesar de que apenas existe variación, por lo que una recta horizontal describiría más correctamente la tendencia. De hecho, tanto para las sensibilidades de la Fig. 4.51 como de la Fig. 4.52, una recta horizontal sería más coherente que las variaciones que se observan, que no son crecientes ni decrecientes, por lo que se ha comentado sobre la incertidumbre.



**Figura 4.52.** Sensibilidades del Módulo de Young y del exponente  $n$ , para los ajustes realizados forzando el máximo.

## 4.5 Tracciones de la Fundición gris

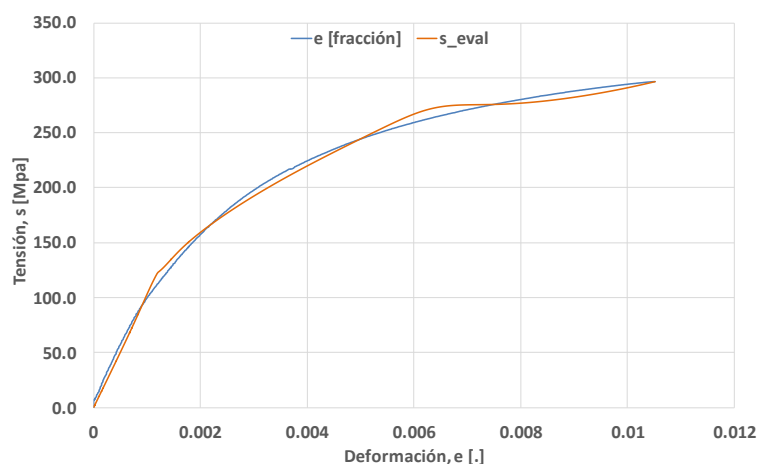
### Ajustes realizados

En este apartado se presentan los ajustes realizados con probetas de Fundición gris. Las curvas de tracción reales obtenidas con este material difieren de las del resto de materiales, por lo cual el ajuste obtenido ha sido menos preciso. En la Tabla 4.15 se pueden observar los valores de  $R^2$  obtenidos para cada probeta, habiendo conseguido un ajuste con un promedio de  $R^2$  de 0.995.

**Tabla 4.15.** Valor de  $R^2$  obtenido para el ajuste de cada probeta de Fundición.

Probeta	F-01	F-02	F-03	F-04	F-05	F-06	F-07	F-08
$R^2$	0.9963	0.9970	0.9983	0.9965	0.9966	0.9844	0.9950	0.9962

A continuación, se presentan los ajustes realizados. Como en el resto de los materiales, solo se ha representado una curva de ajuste por cada par de probetas iguales, aunque en la base de datos se han tenido en cuenta todas las probetas.

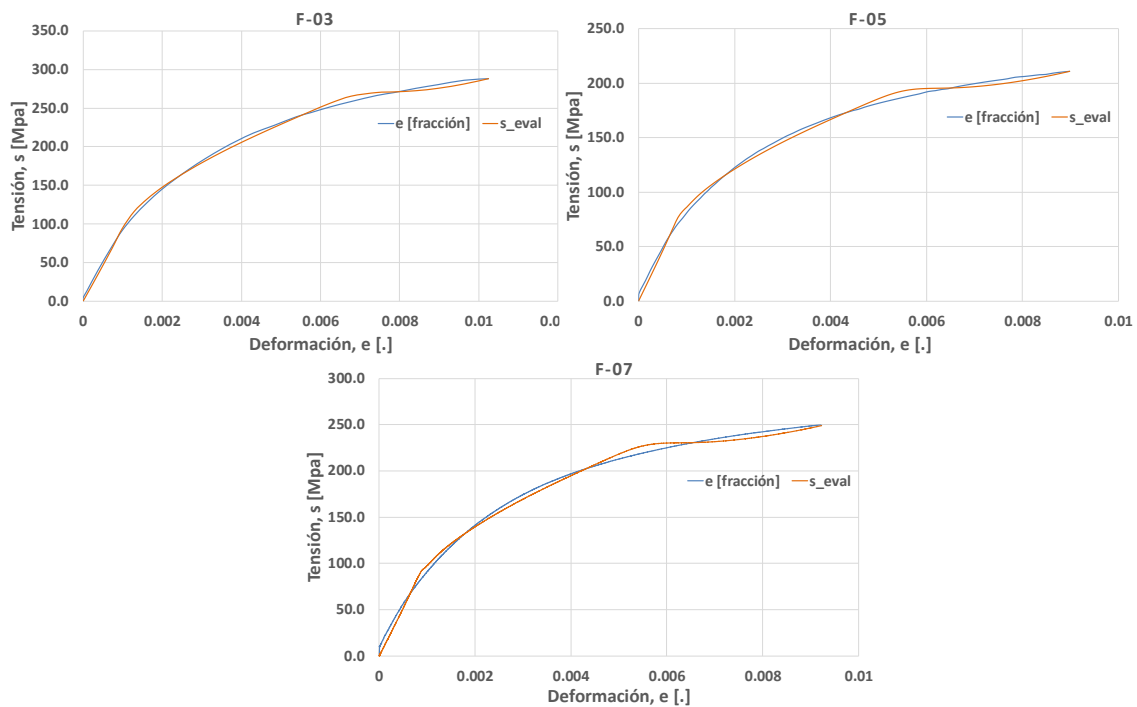


**Figura 4.53.** Tracción de la Fundición F-01.

Tal como se observa en la Fig. 4.53 la curva de tensión evaluada no ajusta bien la curva real, obteniendo un pico que el programa toma como valor máximo y que no se corresponde con el máximo real. Como se ha comentado para otros materiales, la obtención del punto de esfuerzo máximo es un error que se repite en los ajustes realizados, por lo que queda claro que es un aspecto que mejorar del código. A pesar de que podrían añadirse restricciones con la herramienta Solver, fijar este punto restaría grados de libertad al programa, lo cual puede ser perjudicial para el ajuste.

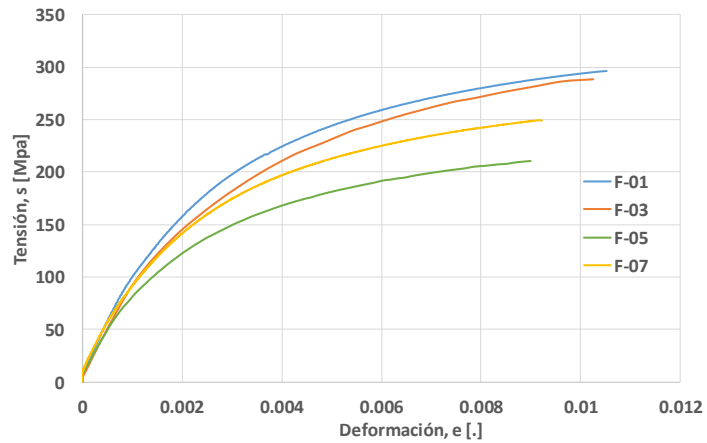
Este comportamiento y estos errores de ajuste se observan del mismo modo en la Fig. 4.54, donde se han representado el resto de las curvas de las probetas de Fundición que se iban a mostrar en este apartado.

Durante el análisis de la sensibilidad de este material con respecto a la velocidad de ensayo se comentarán las técnicas empleadas para tratar de mejorar estos ajustes. Se observará que, a pesar de que globalmente el ajuste es bastante bueno, como se demostró en la Tabla 4.15 la tendencia que deberían seguir los parámetros de los ensayos no es correcta, por lo que el ajuste no es óptimo.

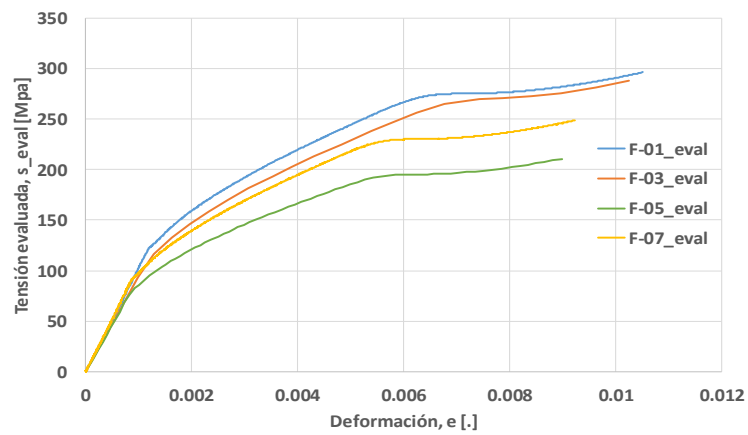


**Figura 4.54.** Tracción de las Fundiciones F-03, F-05 y F-07.

A pesar de que los errores que se han comentado indican que debería realizarse un nuevo ajuste forzando el valor del punto máximo, a modo de comprobación del ajuste global de las curvas, se han representado conjuntamente las curvas reales (Fig. 4.55) y las simuladas (Fig. 4.56) a partir de los ajustes presentados hasta ahora. Se han representado las tracciones de las probetas F-01, F-03, F-05 y F-07.



**Figura 4.55.** Conjunto de tracciones reales de las probetas de Latón.



**Figura 4.56.** Conjunto de tracciones simuladas de las probetas de Latón.

Se observa que las curvas de la Fig. 4.56 reproducen la tendencia global de las curvas reales de la Fig. 4.55, aunque el error cometido entorno al punto máximo debe ser solventado, como se explicará a continuación.

### Sensibilidad de la Fundición con respecto a la velocidad de ensayo

Para estudiar la sensibilidad de la Fundición con respecto a la velocidad de ensayo, al igual que para el Latón, se obtuvieron los valores promedio de las características a estudiar a partir de los resultados obtenidos para cada pareja de probetas iguales. Estos valores promedio se muestran en la Tabla 4.16.

**Tabla 4.16.** Datos recogidos de los ensayos de tracción realizados con las probetas de Fundición a distintas velocidades.

vel [mm/s]	EY [MPa]	eM [.]	eF [.]	sM [MPa]	sF [MPa]	n[.]
0.0125	89271.41	0.0069	0.0111	249.07	270.96	0.4507
0.335	96752.08	0.0062	0.0094	247.31	267.90	0.4750
0.1	1866788	0.0056	0.0086	214.80	231.18	0.3999
0.0035	96167.53	0.0057	0.0093	226.63	247.15	0.4686

Se ha normalizado la velocidad de ensayo tal y como se hizo con el resto de los materiales, ya que es el parámetro respecto al que se va a estudiar la sensibilidad.

De nuevo, ya que ninguna probeta presentaba zona de fluencia, no se ha estudiado la evolución de la longitud de esta zona (*def*) ni la de la tensión del límite inferior de la zona de fluencia (*sLEinf*). Tampoco se estudia la variación del límite elástico (*eLE*).

A continuación, van a presentarse gráficamente las variaciones del resto de los parámetros que aparecen en la Tabla 4.16 con respecto a la velocidad. Estas representaciones se muestran en la Fig. 4.57. En ella se observa que las tendencias obtenidas no se corresponden con las que deberían seguirse en la realidad.

En la práctica, a mayor velocidad de ensayo, menor debería ser la deformación obtenida. Puesto que el punto final de la curva conlleva una cierta incertidumbre, debido a que los datos representados se han escogido de los proporcionado por la máquina de manera subjetiva y poco precisa, el punto crítico en torno al que se comprobarán las tendencias será el máximo.

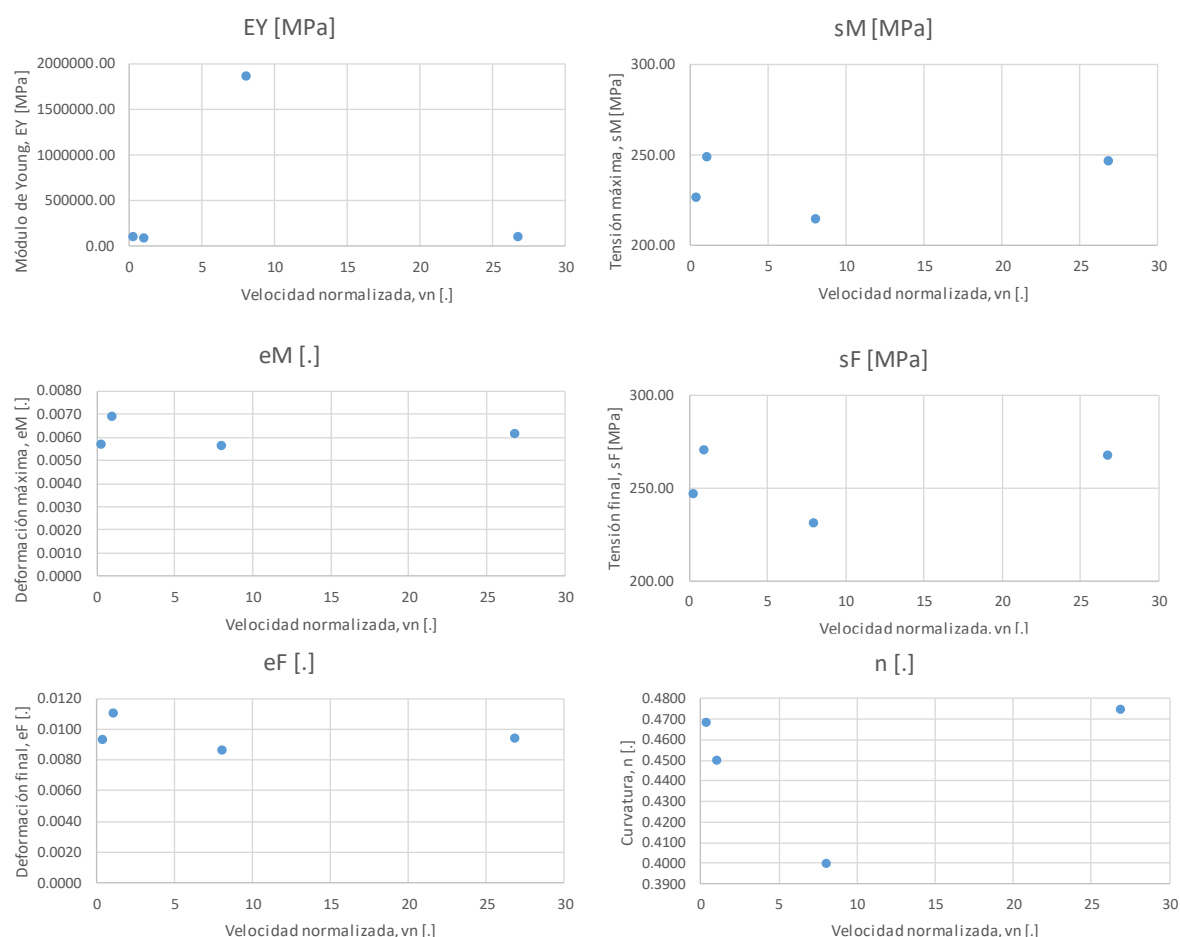
En la Fig. 4.57 parece que tanto la deformación como la tensión correspondiente al punto de esfuerzo máximo siguen una tendencia lineal. Puesto que en muchos de los ajustes este punto máximo no se obtenía de manera exacta por el programa, se ha realizado una nueva tanda de ajustes, en los que se ha forzado este punto mediante restricciones del Solver de Excel. De esta forma se comprobará si, al menos en la realidad, las tracciones siguen la tendencia que cabe esperar.

Además, en la Tabla 4.17 se muestran los valores de  $R^2$  obtenidos para estos nuevos ajustes.

**Tabla 4.17.** Valor de  $R^2$  obtenido para el ajuste de cada probeta de Fundición.

Probeta	F-01	F-02	F-03	F-04	F-05	F-06	F-07	F-08
$R^2$	0.9821	0.9852	0.9874	0.9898	0.9654	0.9763	0.9590	0.9842

Como puede observarse en la Tabla 4.17, los ajustes realizados forzando el punto máximo conllevan un error mayor que los anteriores, que tenían todo un valor de  $R^2$  mayor a 0.99.

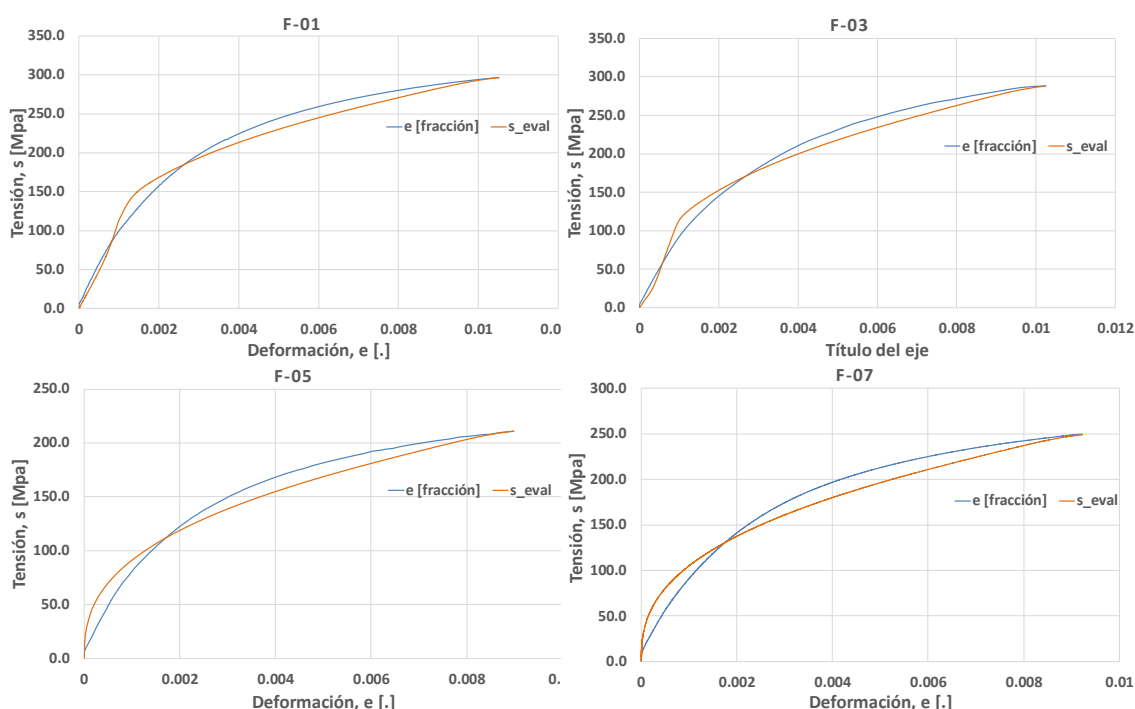


**Figura 4.57.** Sensibilidades de la Fundición con respecto a la velocidad de ensayo.

Tal y como se ha explicado, en la Fig. 4.57 se muestran los nuevos ajustes realizados con las probetas de Acero C45 normalizado, forzando el punto máximo. Como hasta ahora, se muestra una curva de tracción por cada par de probetas iguales.

Al igual que se dedujo de la comparación de las tablas 4.15 y 4.17, se puede observar en la Fig. 4.58 que estos ajustes son de peor calidad que los cuales en los que no se fijó el punto máximo. A pesar de ello, en este caso el punto máximo sí coincide con el final, al igual que en las curvas de tracción reales. Por lo tanto, comprobar si los puntos máximos de estas

simulaciones siguen la tendencia correcta con el variar de la velocidad de ensayo equivalentes a evaluar si la tendencia de los parámetros reales es coherente.



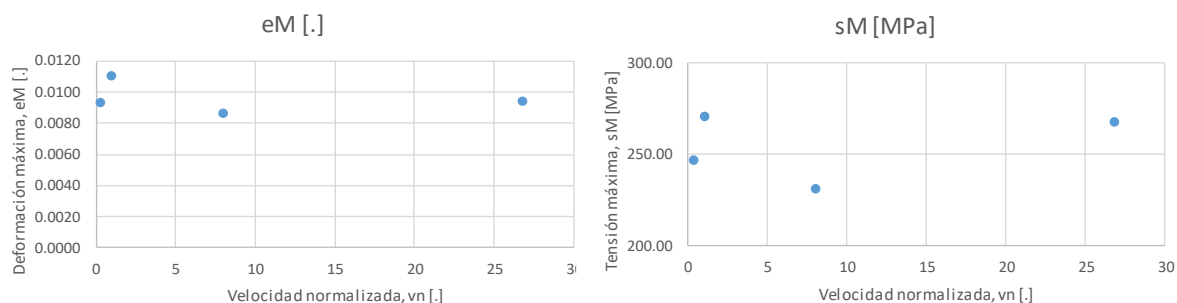
**Figura 4.58.** Ajustes de las probetas de Fundición forzando el punto máximo.

A continuación, se presentan los datos recogidos en la nueva base de datos, en la Tabla 4.18, y las gráficas de la tendencia del punto máximo de dicha tabla, en la Fig. 4.59.

**Tabla 4.18.** Datos recogidos de los ensayos de tracción realizados con las probetas de Fundición a distintas velocidades, forzando el máximo.

vel [mm/s]	EY [MPa]	eM [.]	eF [.]	sM [MPa]	sF [MPa]	n[.]
0.0125	83979.62	0.0111	0.0111	270.96	270.96	0.3445
0.335	82661.09	0.0094	0.0094	267.90	267.90	0.3624
0.1	1889571.87	0.0086	0.0086	231.18	231.18	0.3405
0.0035	981953.27	0.0093	0.0093	247.15	247.15	0.3654





**Figura 4.59.** Tendencia del punto máximo del ajuste de las probetas de Fundición forzando el máximo.

A pesar de haber forzado el nuevo ajuste, comparando la Fig. 4.59 con la tendencia del máximo observada en la Fig. 4.58, se puede ver que la tendencia es la misma. Las variaciones son del orden de 0.01, por lo que podría decirse que, dado que el margen de velocidades con el que se está trabajando es pequeño, la incertidumbre del proceso no permite que se aprecien dichas variaciones. Por lo tanto, a pesar de que se debería observar una disminución de la deformación para el punto de esfuerzo máximo, dicha tendencia no es apreciable.

Normalizando las variables de las sensibilidades mostradas en la Fig. 4.58, se obtuvieron las gráficas de la Fig. 4.60, en las que se ha obtenido la curva de tendencia y el polinomio que mejor la ajusta. Para normalizar las variables, se han dividido las diferentes magnitudes entre los valores obtenidos a la velocidad de referencia. Los valores normalizados se presentan en la Tabla 4.19. Esto se ha realizado a partir de los datos de los ensayos realizados forzando el punto máximo, a pesar del mayor error de ajuste, pues es la forma de asegurarse de que la tendencia, al menos de este punto, encaja con la real. Dado que el punto máximo y el final coinciden, solo se presenta el máximo.

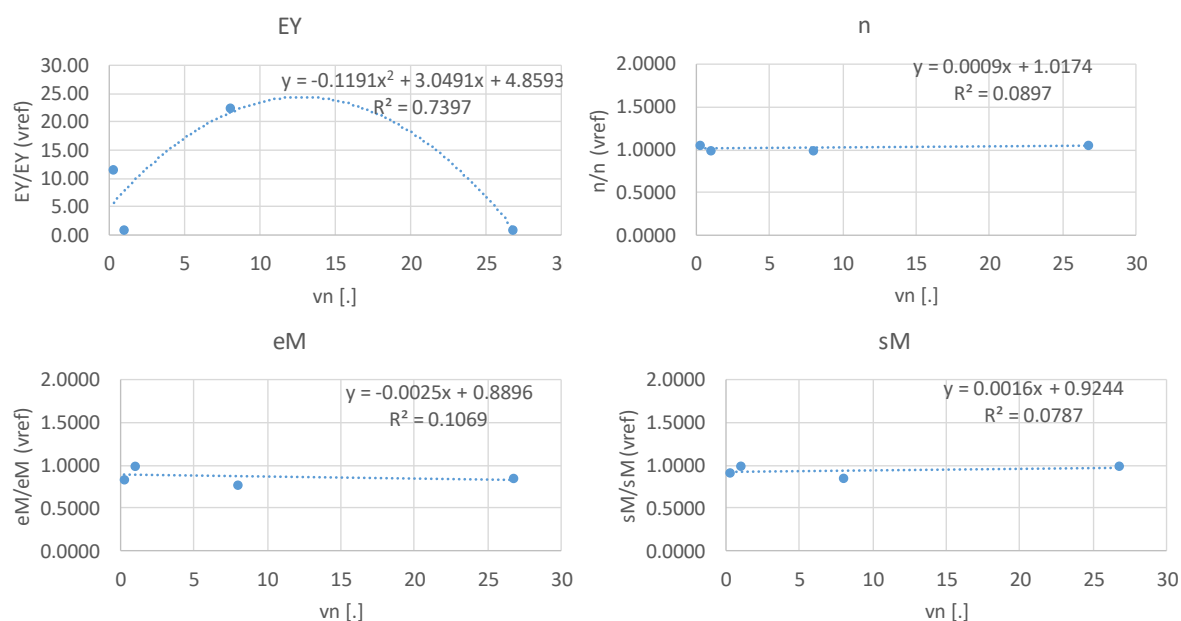
**Tabla 4.19.** Parámetros normalizados de los ensayos de las probetas de Fundición.

vel [mm/s]	EY [MPa]	eM [.]	eF [.]	sM [MPa]	sF [MPa]	n[.]	vn
0.0125	1.00	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1
0.335	0.98	0.8464	0.8464	0.9887	0.9887	1.0520	26.8
0.1	22.50	0.7792	0.7792	0.8532	0.8532	0.9885	8
0.0035	11.69	0.8432	0.8432	0.9121	0.9121	1.0609	0.28

Tal y como puede observarse en la Tabla 4.19 y en la Fig 4.54, y como se había comentado, la tendencia del punto máximo es lineal, decreciéndola deformación y aumentando el esfuerzo.

La sensibilidad del módulo de Young ( $EY$ ) con respecto a la velocidad no parece seguir una evolución razonable. Dado que este parámetro representa la pendiente de la región elástica y que los ajustes obtenidos forzando el punto máximo no aproximan bien esta recta, no se

considera relevante la tendencia obtenida. Aunque se estudiara la tendencia de este parámetro a partir del primer ajuste, no sería coherente, como se puede comprobar en la Fig. 4.60.



**Figura 4.60.** Polinomios de tendencia de las sensibilidades de los parámetros con respecto a la velocidad de ensayo, para las probetas de Fundición.

## 5. Conclusiones

---

A partir de las discusiones realizadas en el capítulo 4, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

Uno de los problemas principales que conlleva cualquiera de los ajustes que se han realizado y que puedan realizarse en un futuro es la lectura de datos que realiza la máquina empleada para el ensayo de tracción. Como se observó en las figuras 4.14 y 4.15, en ciertas ocasiones la curva de tracción real obtenida por la máquina es errónea. Por lo tanto, es conveniente que siempre se comprueben las curvas para realizar más ensayos con probetas iguales cuando fuera necesario. Es por esta razón por la que para este trabajo se han ensayado dos probetas iguales en cada caso, de forma que el error que pudiera haber cometido la máquina se redujera. También es conveniente eliminar los datos que puedan resultar erróneos a simple vista, como se ha hecho en muchos casos cuando aparecía valores de esfuerzo y/o deformación negativos. Otro de los fallos más importantes que se han observado y que se produce debido al registro indebido de los datos por parte de la máquina es la determinación del punto de rotura. Dado que la máquina sigue registrando datos aun cuando el material ya ha roto, aparece una cola que debe ser eliminada de manera subjetiva y, por supuesto, manual. La incertidumbre que conlleva esta eliminación es tal que no puede saberse si realmente el último punto de la lista que es considerado válido se corresponde ciertamente o no con el punto de rotura. Esto provoca que no pueda saberse con certidumbre la deformación que es capaz de soportar el material ni la tensión a la que rompe, por lo que no puede estudiarse con rigor la sensibilidad de estas propiedades ante cambios en las condiciones de ensayo.

El fallo que se repite en todos los ajustes realizados, tanto con la primera versión del simulador como con la segunda, es la determinación del punto máximo de la curva. Como ya se ha realizado en el apartado anterior, una posible forma de solucionarlo es añadir restricciones mediante la herramienta Solver de Excel. Sin embargo, dado que la finalidad de este trabajo es lograr que cualquier usuario sea capaz de obtener las propiedades principales de las tracciones de cualquier material de manera sencilla, sería más conveniente modificar el código del programa de forma que se localizara dicho punto sin necesidad de realizar ninguna acción extra por parte del usuario. La lectura del valor de esfuerzo máximo se podría realizar de manera directa, ya que Excel dispone de una operación (*MAX*) que identifica el valor máximo de una lista de datos. A partir de este esfuerzo, habría que localizar el valor de deformación que el

corresponde. Es posible que el grado de ajuste de la curvatura de la región plástica mejorara al obtenerse el punto máximo correcto.

En cuanto a la curvatura, tal y como se ha demostrado en el capítulo 4, se ajusta mucho mejor si se deja libre el parámetro  $n$  y se fija el valor de la tensión de fluencia. Es por ello que las futuras versiones del programa se realizarán a partir de la segunda versión empleada en este trabajo.

Como se ha discutido en el apartado anterior, el estudio de la sensibilidad en el rango de temperaturas y velocidades escogido es bastante difícil. Esto se debe a que dicho rango es tan pequeño que la incertidumbre del programa podría ser mayor que las variaciones observadas. Esto puede haber provocado que las tendencias observadas no se correspondieran con las reales.

También se ha discutido durante el estudio de los distintos materiales el modo de evaluar si el ajuste era bueno o no. Dado que se han obtenido valores de  $R^2$  muy altos, lo lógico sería decir que sí. Sin embargo, un ajuste global bueno no implica que la tendencia real del material se corresponda con la real, lo cual es de crucial importancia para lograr el objetivo de este trabajo, que es conocer a partir de las simulaciones, cómo evolucionaría un material en distintas condiciones, para elegir aquellos que cumplan con los requisitos necesarios para una situación determinada. Por eso, es conveniente que siempre que se realice una nueva versión del programa, se comprueben las curvas reales y simuladas de cada probeta individualmente, y también conjuntamente en distintas condiciones, además de realizar un estudio de sensibilidad de cada uno de los parámetros que han estudiado en el capítulo 4. De esta forma podrá comprobarse si en todas las representaciones la simulación es coherente con lo esperado en la práctica y, por lo tanto, si puede dejarse en manos de estas simulaciones la criba de materiales a ensayar.

Por lo tanto, en cuanto a la versión de los ajustes obtenidos hasta ahora, se concluye que no debe darse por terminada la tarea de buscar un programa de simulación de curvas de tracción. A pesar de que algunos de los ajustes sean muy buenos, es necesario obtener una versión del programa que ajuste correctamente cualquier material. Las tareas por realizar para lograrlo se describen en el capítulo 6.

## 6. Líneas futuras

---

Para lograr el objetivo principal de este trabajo, obtener un simulador de curvas de tracción que permita reducir el número de posibles materiales que satisfacen unas características concretas, así como reducir el número de ensayos a realizar, será necesario tomar la información obtenida y redactada en este documento y continuar con la documentación de materiales.

En primer lugar, para completar los materiales estudiados hasta ahora, se debería repetir el ensayo de tracción de las probetas que han dado errores en la lectura de datos (como las de las figuras 4.14 y 4.15 y el ensayo de las probetas N-01 y N-02, que han dado ciertos problemas de ajuste).

Además, para los materiales para los que se ha estudiado la sensibilidad con respecto a la velocidad de ensayo, debería estudiarse también la sensibilidad con respecto a la temperatura y viceversa, para cubrir todas las posibles condiciones de trabajo.

Debería aumentarse el rango de velocidades y temperaturas estudiado para comprobar que el comportamiento observado en el rango escogido hasta ahora puede extrapolarse a cualquier otro mayor.

Deberían corregirse los fallos comentados en el capítulo 5, que sobre todo se refieren a la correcta identificación del punto máximo y del punto de rotura.

Por último, lo ideal sería ensayar y simular el mayor número de materiales posible, ya que un material que no haya sido ensayado no podrá ser simulado en un futuro. Realizando todo esto, y comprobando que los ajustes sean coherentes con la realidad, podría darse por terminada la obtención de un buen desarrollador.

Una vez que la versión del programa sea considerada la óptima, será necesario hacer uso de un programa que obtenga el polinomio de tendencia de cada uno de los parámetros de la curva de tracción estudiados, tanto para variaciones de velocidad como para variaciones de temperatura. Este polinomio será el que permita obtener las propiedades fundamentales de un material ensayado a cualquier temperatura o velocidad.

## 7. Índice de Figuras

---

Figura 1.1. Curva de tracción ingenieril de un metal genérico.....	12
Figura 3.1. Hoja Excel de Simulación. ....	23
Figura 3.2. Introducción de datos conocidos en la versión inicial del programa. ....	24
Figura 3.3. Datos calculados por la primera versión del programa. ....	25
Figura 3.4. Formato de datos en bruto proporcionados por la máquina del ensayo de tracción. ....	26
Figura 3.5. Formato de las bases de datos para materiales ensayados a distintas velocidades. ....	27
Figura 4.1. Tracción del Acero C45 N-01. ....	29
Figura 4.2. Tracción del Acero C45 N-02. ....	30
Figura 4.3.....	30
Figura 4.4. Tracción del Acero C45 N-010 ....	30
Figura 4.5. Tracción del Acero C45 N-011. ....	31
Figura 4.6. Tracción del Acero C45 N-012. ....	31
Figura 4.7. Tracción del Acero C45 N-013. ....	32
Figura 4.8. Tracción del Acero C45 N-014. ....	32
Figura 4.9. Nuevo ajuste Acero C45-N01. ....	33
Figura 4.10. Nuevo ajuste Acero C45-N02. ....	33
Figura 4.11. Conjunto de tracciones reales N-01, N-09, N-11, N-13.....	34
Figura 4.12. Conjunto de tracciones evaluadas N-01, N-09, N-11, N-13. ....	34
Figura 4.13. Tracción Acero C45-R-01. ....	35
Figura 4.14. Tracción Acero C45-T-01. ....	36
Figura 4.15. Tracción Acero C45-TE-01. ....	36
Figura 4.16. Tracción Acero C45-T-05. ....	37
Figura 4.17. Tracción Acero C45-T-07. ....	37
Figura 4.18. Tracción Acero C45-TA-01. ....	38
Figura 4.19. Tracción Acero C45-TB-01. ....	38
Figura 4.20. Tracción Acero C45-TR-01. ....	39
Figura 4.21. Sensibilidad del Módulo de Young y del límite elástico del Acero C45-N.....	40
Figura 4.22. Sensibilidad y polinomio de tendencia del Módulo de Young y del límite elástico del Acero C45-N. ....	41
Figura 4.23. Sensibilidad y polinomio de tendencia del punto máximo y de rotura del Acero C45-N. .	42
Figura 4.24. Sensibilidad y polinomio de tendencia de la longitud de la zona de fluencia y la tensión inferior de dicha zona, para el Acero C45-N.....	43

Figura 4.25. Sensibilidad y polinomio de tendencia de $n$ , para el Acero C45-N.....	43
Figura 4.26. Tracción Aluminio 2011 O-01. ....	44
Figura 4.27. Tracción Aluminio 2011 O-03. ....	45
Figura 4.28. Tracción Aluminio 2011 O1-01. ....	45
Figura 4.29. Tracción Aluminio 2011 T7-01.....	46
Figura 4.30. Tracción Aluminio 2011 H2-01. ....	46
Figura 4.31. Tracción Aluminio 2011 T6.....	47
Figura 4.32. Conjunto de tracciones reales de las probetas de Aluminio 2011 T6. ....	47
Figura 4.33. Conjunto de tracciones simuladas de las probetas de Aluminio 2011 T6. ....	48
Figura 4.34. Tracción Aluminio 2011 SH-03. ....	48
Figura 4.35. Ajuste de las probetas de Aluminio 2011 T6 forzando el punto máximo.....	50
Figura 4.36. Sensibilidades del punto de máxima tensión y del punto de rotura del Aluminio 2011 T6. .....	52
Figura 4.37. Sensibilidades del punto del Módulo de Young y del exponente $n$ del Aluminio 2011 T6. .....	52
Figura 4.38. Tracción del Acero 304 A-01. ....	53
Figura 4.39. Tracción del Acero 304 A-02. ....	54
Figura 4.40. Tracción del Acero 304 A-03. ....	54
Figura 4.41. Tracción del Acero 304 A-11. ....	55
Figura 4.42. Tracción del Acero 304 A-12. ....	55
Figura 4.43. Tracción del Latón L-01. ....	56
Figura 4.44. Tracción del Latón L-03. ....	57
Figura 4.45. Tracción del Latón L-05. ....	57
Figura 4.46. Tracción del Latón L-07. ....	57
Figura 4.47. Conjunto de tracciones reales de las probetas de Latón. ....	58
Figura 4.48. Conjunto de tracciones simuladas de las probetas de Latón.....	58
Figura 4.49. Sensibilidades del punto de esfuerzo máximo y del punto de rotura del Latón. ....	60
Figura 4.50. Tracciones del Latón forzando el valor del punto máximo. ....	61
Figura 4.51. Sensibilidades del punto de esfuerzo máximo y del punto de rotura del Latón, para los ajustes realizados forzando el máximo.....	62
Figura 4.52. Sensibilidades del Módulo de Young y del exponente $n$ , para los ajustes realizados forzando el máximo. ....	62
Figura 4.53. Tracción de la Fundición F-01.....	63
Figura 4.54. Tracción de las Fundiciones F-03, F-05 y F-07. ....	64
Figura 4.55. Conjunto de tracciones reales de las probetas de Latón. ....	65

Figura 4.56. Conjunto de tracciones simuladas de las probetas de Latón. ....	65
Figura 4.57. Sensibilidades de la Fundición con respecto a la velocidad de ensayo. ....	67
Figura 4.58. Ajustes de las probetas de Fundición forzando el punto máximo. ....	68
Figura 4.59. Tendencia del punto máximo del ajuste de las probetas de Fundición forzando el máximo. .....	69
Figura 4.60. Polinomios de tendencia de las sensibilidades de los parámetros con respecto a la velocidad de ensayo, para las probetas de Fundición. ....	70



## 8. Índice de Tablas

---

Tabla 2.1. Probetas de acero C45 ensayadas a la velocidad recomendada (0.0125 mm/s). .....	19
Tabla 2.2. Probetas de acero C45 ensayadas a distintas velocidades. ....	19
Tabla 2.3. Probetas de aluminio ensayadas a la velocidad recomendada (0.0125 mm/s). ....	20
Tabla 2.4. Probetas de aluminio ensayadas a distintas velocidades. ....	20
Tabla 2.5. Probetas de acero 304 ensayadas a la velocidad recomendada (0.0125 mm/s). ....	21
Tabla 2.6. Probetas de acero 304 ensayadas a distintas velocidades.....	21
Tabla 2.7. Probetas de latón ensayadas a la velocidad recomendada (0.0125 mm/s).....	21
Tabla 2.8. Probetas de latón ensayadas a distintas velocidades.....	22
Tabla 2.9. Probetas de Fundición gris ensayadas a la velocidad recomendada (0.0125 mm/s). ....	22
Tabla 2.10. Probetas de Fundición gris ensayadas a distintas velocidades. ....	22
Tabla 4.1. Valor de $R^2$ obtenido para el ajuste de cada probeta de Acero C45.....	35
Tabla 4.2. Datos recogidos de los ensayos de tracción realizados con las probetas de Acero C45 a distintas velocidades.....	39
Tabla 4.3. Datos recogidos de los ensayos de tracción realizados con las probetas de Acero C45 a distintas velocidades normalizados.....	40
Tabla 4.4. Valor de $R^2$ obtenido para el ajuste de cada probeta de Aluminio 2011 T6. ....	44
Tabla 4.5. Datos recogidos de los ensayos de tracción realizados con las probetas de Aluminio 2011 T6 a distintas velocidades. ....	49
Tabla 4.6. Valor de $R^2$ obtenido para el ajuste de cada probeta de Aluminio 2011 T6, forzando el máximo.....	50
Tabla 4.7. Datos recogidos de los ensayos de tracción realizados con las probetas de Aluminio 2011 T6 a distintas velocidades, forzando el punto máximo. ....	50
Tabla 4.8. Datos normalizados recogidos de los ensayos de tracción realizados con las probetas de Aluminio 2011 T6 a distintas velocidades, forzando el punto máximo. ....	51
Tabla 4.9. Valor de $R^2$ obtenido para el ajuste de cada probeta de Acero 304.....	53
Tabla 4.10. Valor de $R^2$ obtenido para el ajuste de cada probeta de Latón.....	56
Tabla 4.11. Datos recogidos de los ensayos de tracción realizados con las probetas de Latón a distintas velocidades.....	59
Tabla 4.12. Datos normalizados recogidos de los ensayos de tracción realizados con las probetas de Latón a distintas velocidades. ....	59
Tabla 4.13. Valor de $R^2$ obtenido para el ajuste de cada probeta de Latón forzando el punto máximo. ....	60

Tabla 4.14. Datos normalizados recogidos de los ensayos de tracción realizados con las probetas de Latón a distintas velocidades forzando el punto máximo.....	61
Tabla 4.15. Valor de $R^2$ obtenido para el ajuste de cada probeta de Fundición. ....	63
Tabla 4.16. Datos recogidos de los ensayos de tracción realizados con las probetas de Fundición a distintas velocidades.....	66
Tabla 4.17. Valor de $R^2$ obtenido para el ajuste de cada probeta de Fundición. ....	67
Tabla 4.18. Datos recogidos de los ensayos de tracción realizados con las probetas de Fundición a distintas velocidades, forzando el máximo. ....	68
Tabla 4.19. Parámetros normalizados de los ensayos de las probetas de Fundición.....	69

## 9. Bibliografía

---

- [1] Norma UNE-EN ISO 6892. Materiales Metálicos. Ensayo de Tracción. Vol. 1: Método de ensayo a temperatura ambiente. AENOR: España; 2010.
- [2] Norma UNE-EN ISO 6892. Materiales Metálicos. Ensayo de Tracción. Vol. 2: Método de ensayo a temperatura elevada. AENOR: España; 2011.
- [3] Norma UNE-EN ISO 6892. Materiales Metálicos. Ensayo de Tracción. Vol. 3: Método de ensayo a baja temperatura. AENOR: España; 2015.
- [4] Montes J.M., Cuevas F.G., Cintas J. Ciencia e Ingeniería de los Materiales; S.A. Ediciones Paraninfo; España; 2014.